

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Modernizace laboratorních úloh z Elektrických
regulovaných pohonů**

**Modernization of Laboratory Measuring of Controlled
Electrical Drives**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Lakatos**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Modernizace laboratorních úloh z Elektrických regulovaných pohonů**
Modernization of Laboratory Measuring of Controlled Electrical Drives

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te analýzu současně používaných regulačních struktur u vybraných typů výkonových polovodičových měničů.
2. Srovnajte výhody a nevýhody při parametrizaci a ožívování měničů s analogovou a číslicovou regulační strukturou.
3. Na základě pokynů vedoucího diplomové práce vytvořte vybrané typy analogových modelů a zpracujte návody pro laboratorní měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

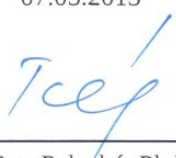
Firemní literatura Siemens, ABB, SEW.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

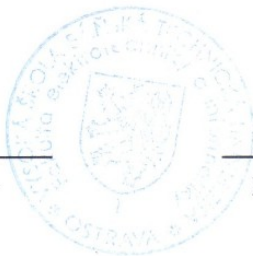
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**


Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou moderních regulovaných struktur u vybraného typu výkonového polovodičového měniče firmy SIEMENS. Byl vybrán měnič SIMOREG DC MASTER řady 6RA70. Dále se práce zabývá výhodami a nevýhodami mezi analogovou a číslicovou regulační strukturou měničů. V dalším kroku se zabývá realizací stejnosměrného cize buzeného motoru pomocí operačních zesilovačů. Nejdříve jsou provedeny simulace v programu OrCad Capture a následně srovnány průběhy s laboratorním přípravkem.

Klíčová slova

Stejnosměrný motor s cizím buzením, měnič, rychlostní struktura, proudová struktura, regulace, rychlostní regulátor, proudový regulátor, SIMOREG, MASTRERDRIVER.

Abstract


This thesis deals with the issue of modern controlled structures for the selected type of power semiconductor converters of SIEMENS. He was selected changer SIMOREG DC MASTER series 6RA70. Furthermore, the work deals with the advantages and disadvantages between analog and digital, the regulatory structure of the converters. In the next step deals with the implementation of a DC motor using induced strange operational amplifiers. As soon as they are made to simulate in the OrCad Capture and subsequently compared with the laboratory courses.

Keywords

DC motor with a foreign excitation, converter, speed structure, the current structure, regulation, speed controller, the current regulátor, SIMOREG, MASTRERDRIVER.

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě, dne 7. května 2013


Podpis.....

Poděkování

Chtěl bych velice poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, kterou mi poskytnul při řešení této diplomové práce.

Seznam použitých zkratek a symbolů

OM	Optimální modul
SO	Symetrické optimum
OP	Operační zesilovač
MČ	Měřicí člen
AČ	Akční člen
REG	Regulátor
S	Regulovaná soustava

Značky a symboly

Symbol	Vysvětlivka	Jednotka
c	konstanta	[-]
C	kapacita	[F]
i, I	proud	[A]
M	moment	[Nm]
n	otáčky	[ot./min.]
R	činný odpor	[Ω]
t	čas	[s]
T	perioda	[s]
u, U	napětí	[V]
f	frekvence	[Hz]
K	zesílené	[-]
Φ	magnetický tok	[-]
τ	časová konstanta	[s]
ω	elektrická úhlová rychlost	[rad/s]
L	cívka	[H]
P	výkon	[W]
δ	toleranční pásmo	[%]

Indexy

a	kotevní
i	indukovaný
max.	maximální
s	skutečný
ž	žádány
ř	řídící

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Simoreg řady 6RA70</i>	<i>2</i>
<i>Obr. 2 Uspořádání komponentů v měniči s aktivním chlazením</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 3 Schéma pro připojení základních řídicích signálů, tachodynamu a napájení</i>	<i>4</i>
<i>Obr. 4 Schéma pro připojení řídicích signálů na vstupní svorky měniče</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 5 Parametrizační jednotka PMU</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 6 Bloková struktura kotevního obvodu</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 7 Bloková struktura budícího obvodu měniče</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 8 Bloková struktura zadávání žádané rychlosti (analogový vstup)</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 9 Bloková struktura nastavení rychlostní adaptace</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 10 Bloková struktura nastavení rychlostní smyčky</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 11 Struktura proudového omezení</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 12 Struktura nastavení proudové smyčky</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 13 Základní zapojení proporcionálního členu</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 14 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika P členu</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 15 Základní zapojení integračního členu</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 16 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika I členu</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 17 Základní zapojení derivačního členu</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 18 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika D členu</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 19 Základní zapojení proporcionálně integračního členu</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 20 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PI členu</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 21 Základní zapojení proporcionálně derivačního členu</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 22 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PD členu</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 23 Základní zapojení Proporcionálně integračně derivační člen</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 24 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PID členu</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 25 Základní zapojení aperiodického členu</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 26 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika aperiodického članku</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 27 Přejchodová, amplitudová charakteristika členu s dopravním zpožděním</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 28 Základní zapojení setrvačného členu 2. Řádu</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 29 Přejchodová charakteristika - aperiodicky přetlumená</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 30 Přejchodová charakteristika - mez aperiodity</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 31 Přejchodová charakteristika - kmitavě tlumená</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 32 Blokové schéma regulačního obvodu</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 33 Přejchodová charakteristika</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 34 LAFFCH otevřeného obvodu dle metody optimálního modulu (OM)</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 35 Přejchodová charakteristika dle metody optimálního modulu (OM)</i>	<i>22</i>

<i>Obr. 36 LAFFCH otevřeného obvodu dle metody symetrického optima (SO)</i>	23
<i>Obr. 37 Přechodová charakteristika dle metody symetrického optima (SO)</i>	23
<i>Obr. 38 Schéma zapojení stejnosměrného cize buzeného motoru</i>	25
<i>Obr. 39 Blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu</i>	25
<i>Obr. 40 Blokové schéma regulace rychlosti motoru s podřazenou smyčkou proudu bez rychlostního čidla</i>	26
<i>Obr. 41 Zjednodušené blokové schéma pro výpočet regulátoru proudu</i>	27
<i>Obr. 42 Zjednodušené blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu</i>	29
<i>Obr. 43 Schéma zapojení modelu stejnosměrného motoru s cizím buzením pomocí operačních zesilovačů</i>	31
<i>Obr. 44 Schéma zapojení modelu stejnosměrného cize buzeného motoru pomocí operačních zesilovačů s vypočtenými hodnotami pro OM</i>	33
<i>Obr. 45 Průběh přechodové charakteristiky stejnosměrného cize buzeného motoru pro výpočet podle OM</i>	34
<i>Obr. 46 Průběhy přechodových charakteristik pro různá zesílení rychlostního regulátoru podle výpočtu OM</i>	35
<i>Obr. 47 Vypočtené hodnoty p regulátoru metodou OM $K_r = 6,25$</i>	35
<i>Obr. 48 Tlumený průběh - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_r = 3,1$</i>	35
<i>Obr. 49 Nevhodné nastavení - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_R=12,5$</i>	36
<i>Obr. 50 Kmitající průběh - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_R=83$</i>	36
<i>Obr. 51 Schéma zapojení stejnosměrného cize buzeného motoru pomocí operačních zesilovačů s vypočtenými hodnotami pro SO</i>	37
<i>Obr. 52 Průběh přechodové charakteristiky modelu stejnosměrného cize buzeného motoru pro výpočet podle SO</i>	38
<i>Obr. 53 Průběhy přechodových charakteristik pro různá zesílení rychlostního regulátoru podle výpočtu SO</i>	39
<i>Obr. 54 Vypočtené hodnoty PI rychlostního regulátoru metodou SO $K_R = 3,12$; $T_R = 42,72 \text{ ms}$</i>	40
<i>Obr. 55 Nevhodné nastavení - nevhodně nastavený regulátor $K_R=1,6$; $T_R=42,72\text{ms}$</i>	40
<i>Obr. 56 Kmitavý průběh</i>	40
<i>Obr. 57 Aperiodický průběh</i>	40

Obsah

1	Úvod	1
2	Popis měniče SIMOREG DC MASTER řady 6RA70	2
2.1	Popis měniče SIMOREG DC MASTER řady 6RA70	2
2.2	Popis činnosti měniče	2
2.2.1	Konektory	4
2.2.2	Binektory	4
2.3	Parametrizace měniče	6
2.4	Popis blokových struktur měniče	9
2.4.1	Popis rychlostní struktury	9
2.4.2	Popis proudové struktury	11
2.5	Srovnání měniče Siemens Sinamics 6RA80 a 6RA70	12
3	Charakteristiky nejdůležitějších členů v regulačních obvodech	13
3.1	Proporcionální člen – P člen	13
3.2	Integrační člen – I člen	13
3.3	Derivační člen – D člen	14
3.4	Proporcionálně integrační člen- PI člen	15
3.5	Proporcionálně derivační člen - PD člen	15
3.6	Proporcionálně integračně derivační člen - PID člen	16
3.7	Aperiodický článek 1. řádu (setrvačný člen)	17
3.8	Člen s dopravním zpožděním	18
3.9	Setrvačný člen 2. řádu – kmitavý článek	18
4	Základní řízení a regulace mechatronických systémů	20
4.1	Kvalita regulačního systému	21
4.2	Metoda optimálního modulu	22
4.3	Metoda symetrického optima	23
5	Stejnoseměrný motor s cizím buzením	24
5.1	Matematický model stejnosměrného motoru s cizím buzením	24
5.2	Regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu	25

5.3	Analýza a syntéza regulačního obvodu rychlosti s podřazenou smyčkou proudu	26
5.4	Zadané hodnoty pro výpočet regulace motoru	26
6	Výpočet regulátoru proudu pomocí optimálního modulu a symetrického optima	27
6.1	Výpočet parametrů metodou optimálního modulu:.....	27
6.2	Výpočet parametrů metodou symetrického optima:.....	28
7	Výpočet regulátoru rychlosti pomocí optimálního modulu a symetrického optima	29
7.1	Výpočet parametrů metodou optimálního modulu:.....	29
7.2	Výpočet parametrů metodou symetrického optima:.....	30
8	Popis laboratorního přípravku	31
9	Simulace a měření na laboratorním přípravku	32
10	Závěr.....	41
11	Použitá literatura.....	42
12	Přílohy	43

1 Úvod

V dnešní době se s oblastí pohonů a jejich regulace setkáváme v každodenním životě. Pohony jsou nedílnou součástí jak v průmyslu, cestování a mnoha jiných odvětví. Bez regulace pohonů se už v dnešní době neobejdeme. V předešlých letech se využívaly pro regulaci více stejnosměrné motory, protože jejich regulace byla dokonalejší. V dnešní době však jsme schopni regulovat jak stejnosměrné tak střídavé pohony, a to s velmi dobrými výsledky. Pro dokonalé řízení těchto pohonů vyrábí několik firem (např. Siemens, ABB) v dnešní době dokonalé měniče. Základem těchto měničů jsou mikroprocesorové jednotky, které umožňují kvalitní a přesné nastavení všech regulačních smyček, komunikaci s ostatními systémy a uživatelem.

Tato diplomová práce je rozdělena do tří částí. V první části je popsána problematika regulačních struktur vybraného typu měniče. V této části jsou popsány regulační struktury měniče 6RA70. V dalším kroku jsou srovnány výhody a nevýhody při parametrizaci a ožívání měničů s analogovou a číslicovou regulační strukturou. V poslední části je realizován model stejnosměrného motoru s cizím buzením pomocí operačních zesilovačů. Tento přípravek bude sloužit pro laboratorní měření do elektrických pohonů. Na přípravku podle výpočtu bude možno nastavit regulaci rychlosti podle optimálního modulu nebo symetrického optima. Na výstupu bude možno měřit přechodové charakteristiky, které odpovídají výstupním otáčkám motoru. Pomocí výměnných patic na laboratorním přípravku bude možno nastavit optimální parametry rychlostního regulátoru a proudového regulátoru, ale také i nevhodné parametry a sledovat, jak se mění výstupní průběhy.

2 Popis měniče SIMOREG DC MASTER řady 6RA70

2.1 Popis měniče SIMOREG DC MASTER řady 6RA70

Měniče této řady jsou již plně digitální kompaktní přístroje s třífázovým napájením. Měniče 6RA70 umožňují práci ve všech čtyřech kvadrantech ω -M diagramu. Tyto měniče slouží k napájení kotvy a v dalším případě k buzení regulovaných stejnosměrných strojů, které mají jmenovité proudy kotvy od 15 A do 2000 A. Při zapojení kompaktních přístrojů paralelně můžeme dosáhnout proudů až okolo 10 000 A. Buzení může být napájeno až 40 A.

2.2 Popis činnosti měniče

Základem zařízení je usměrňovač Simoreg řady 6RA70 od firmy Siemens. Tato řada obsahuje dva výkonné mikroprocesory, které přebírají veškeré funkce regulace pohonu, řízení pohonů a komunikace. Funkce pro regulaci pohonu jsou obsaženy v softwaru programovými moduly.

Jmenovité stejnosměrné proudy těchto měničů v první zatěžovací třídě je možno překračovat 1,5 - násobně, přičemž doba přetížení je dána pro každý typ měniče jiná. Pro druhou zatěžovací třídu je povoleno překročení o 50% po dobu 60 s při periodě 300 s. Mikroprocesor pravidelně kontroluje, zda aktuální hodnota I^2t výkonové části není tak velká, aby nedošlo ke zničení tyristorů.



Obr. 1 Simoreg řady 6RA70

První mikroprocesor se stará o napájení obvodu kotvy. Tato jednotka se skládá ze dvou plně řízených trojfázových můstků zapojených antiparalelně. Tohle zapojení nám umožňuje pracovat ve všech čtyřech kvadrantech pracovního diagramu. Rekuperační skupina je zapojená pomocí 12 tyristorů. Řídící úhel u těchto měničů lze nastavit v rozsahu $0^\circ - 165^\circ$ elektrických. Jako ochrana proti přepětí jsou k tyristorům připojeny RC členy (snubbery).

Modul tohoto měniče je provozován bez okruhových proudů, z tohoto důvodu je měnič vybaven logikou, která zajišťuje, že vždy pracuje pouze jeden můstkový usměrňovač a druhý je blokován. Při reverzaci (změna směru otáčení) vzniká krátký časový úsek (tzv. mrtvá doba), kdy nepracuje ani jeden z můstků. Dále je ve struktuře další můstkový polořízený usměrňovač, který slouží k usměrnění budícího proudu. Tento usměrňovač se skládá ze dvou tyristorů a dvou výkonových diod. Tyto měniče jsou samozřejmě vybaveny chladiči a to jak pasivními, tak i aktivními. Do hodnoty asi 210 A jmenovitého usměrněného kotevního proudu se používají pasivní chladiče a nad tuto hodnotu výše jsou přidávány ventilátory.



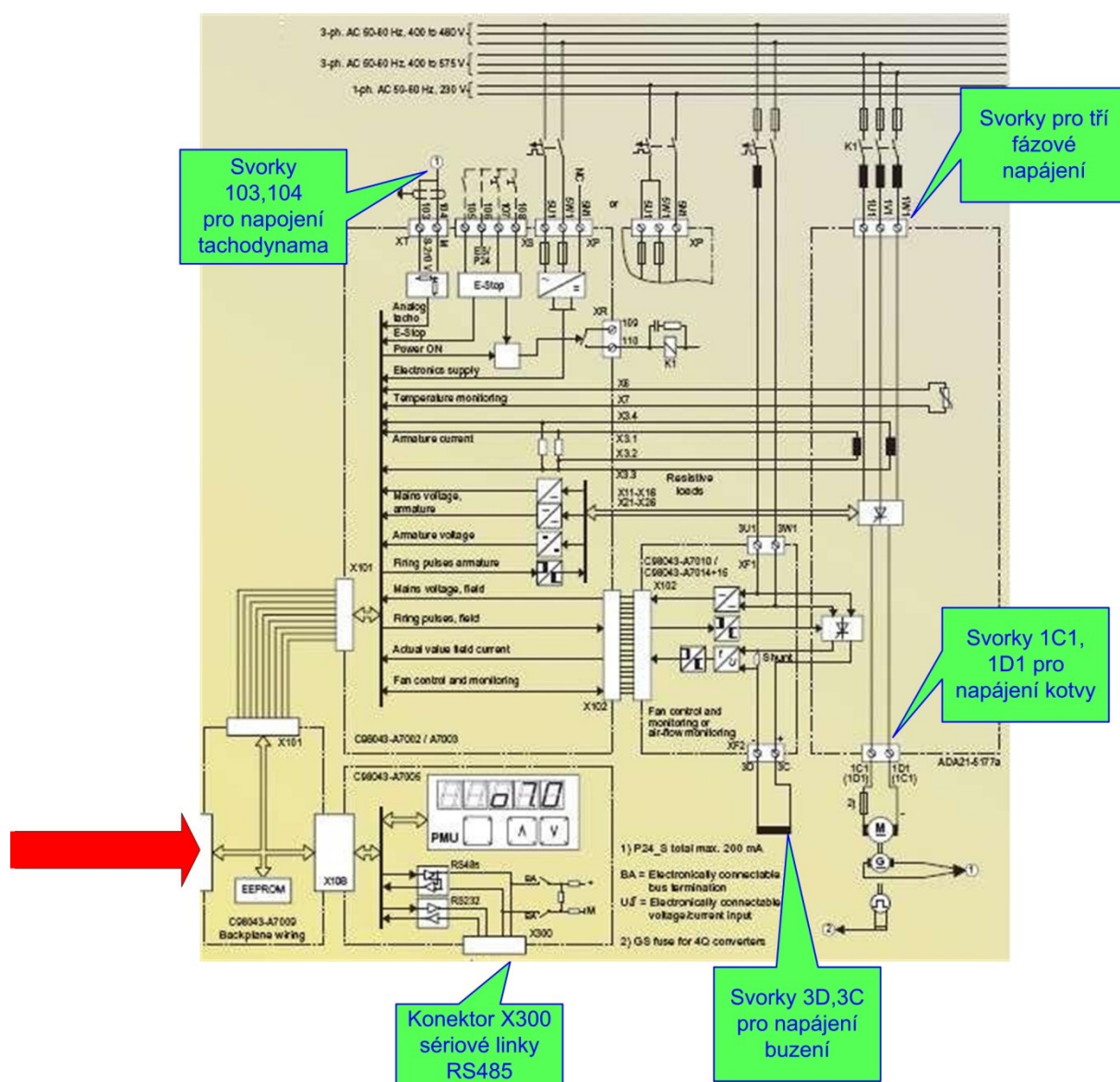
Obr. 2 Uspořádání komponentů v měniči s aktivním chlazením

2.2.1 Konektory

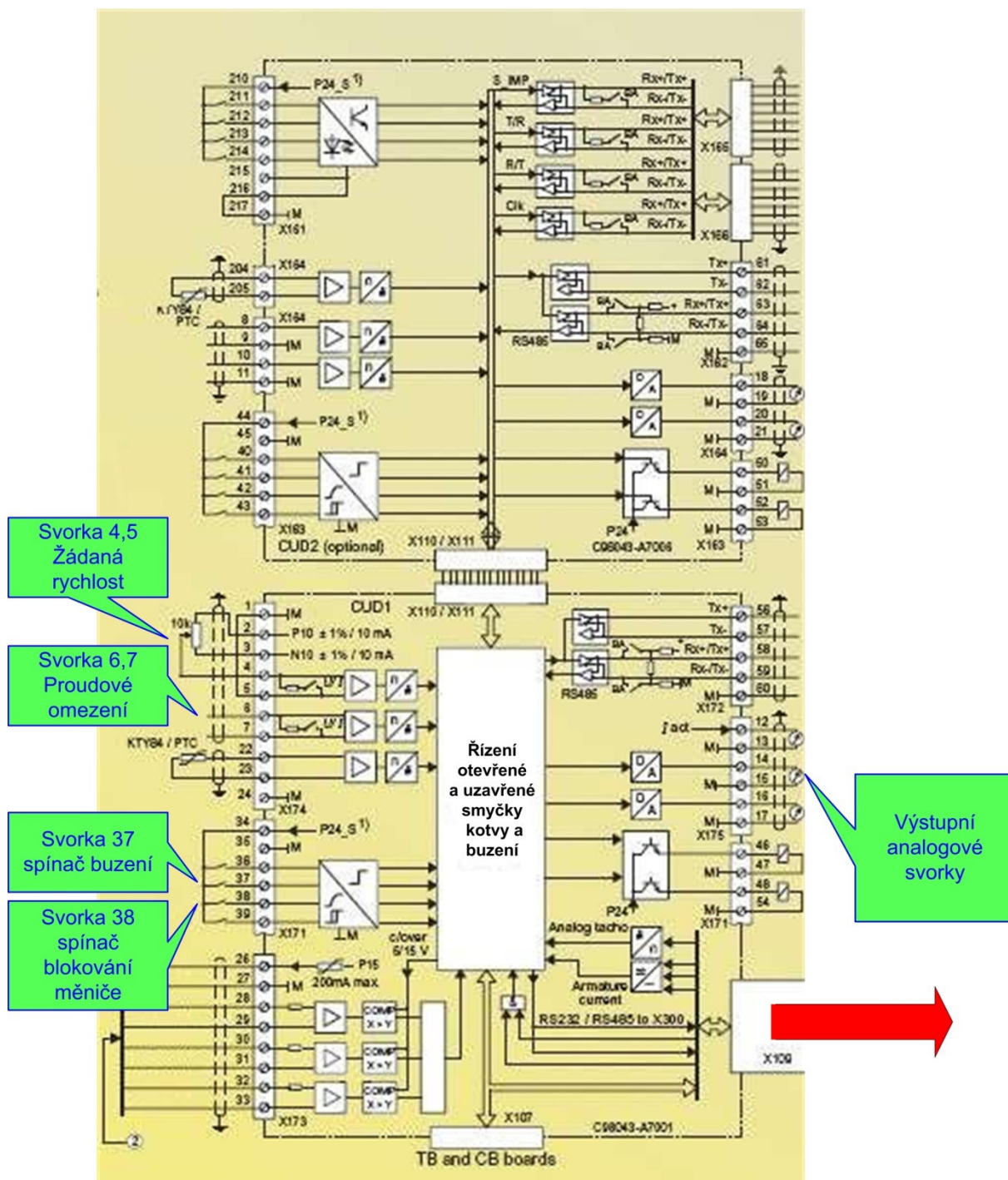
Všechny výstupní proměnné a důležité veličiny vnitřní struktury funkčních bloků jsou k dispozici na konektorech (tyto signály slouží k dalšímu zpracování např. jako vstupní signály pro další funkční bloky). Signály, které získáme pomocí konektorů odpovídající výstupním signálům, respektive měřicím bodům v analogovém zapojení.

2.2.2 Binektory

Jsou to speciální konektory, které nabývají dvou základních hodnot. Tyto hodnoty jsou logická „0“ nebo logická „1“. Binektory odpovídají výstupním signálům a měřicím bodům v digitálním zapojení, které jsou značeny čísly binektorů (např. B0003 = binektor 3).



Obr. 3 Schéma pro připojení základních řídicích signálů, tachodynamu a napájení



Obr. 4 Schéma pro připojení řídicích signálů na vstupní svorky měniče

2.3 Parametrizace měniče

Parametrizace měniče je velmi důležitou součástí měniče. Pro parametrizaci slouží parametrizační jednotka PMU – Parametrization Unit, která je součástí měniče na dvířkách, anebo se parametrizace provádí pomocí počítače s příslušným programem. Pomocí této jednotky lze nastavit parametry pohonu, který bude napájen. Nastavení parametrů se provádí pomocí tří parametrizačních klíčů.

Parametrizace pomocí PMU jednotky se provádí pomocí šipek nahoru a dolů. Těmito šípkami se dále zadávají hodnoty parametrů. Obsluha vybírá mezi logickými hodnotami nebo může nastavit daný rozsah s určitým krokem.

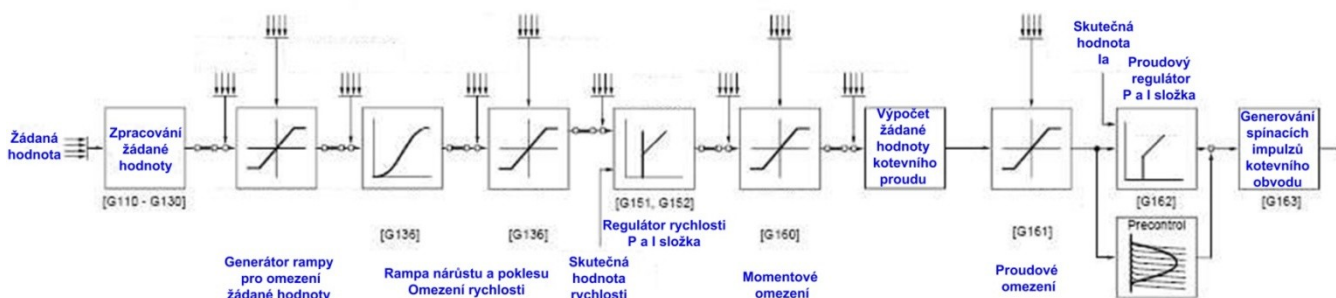


Obr. 5 Parametrizační jednotka PMU

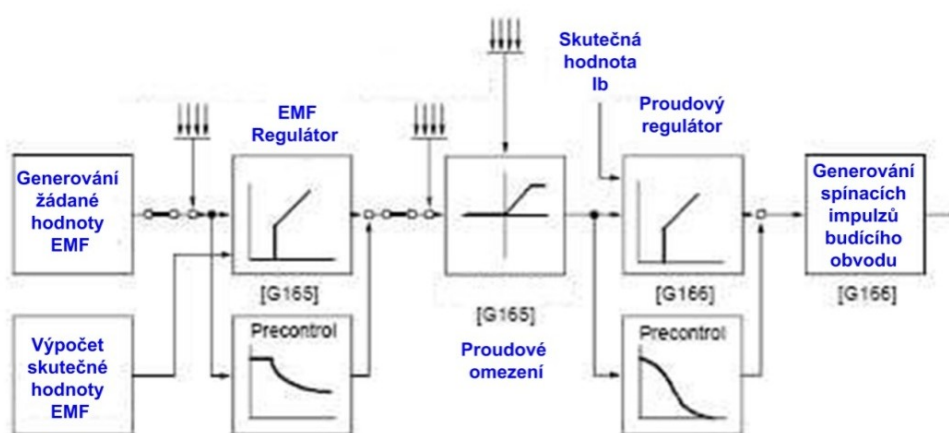
Můžeme tedy nastavit řadu různých funkcí:

- a) **Omezení proudu v závislosti na otáčkách** – Jsou to otáčky stejnosměrného motoru. Při překročení těchto otáček měnič začne automaticky snižovat hodnotu proudu kotvy a chrání tak komutátor a kartáče motoru před poškozením.
- b) **Zrychlení nebo brzdění motoru** – zde se nastavuje čas, za který má motor dosáhnout maximálních jmenovitých otáček při konstantním zrychlení. Podobné parametry se nastavují při brzdění.
- c) **Maximální a minimální otáčky motoru**

Všechny tyto operace jsou zajištěny pomocí generátoru rampy (viz. *Obr. 6*), který dále ještě zajišťuje různé režimy např. pro nízké otáčky (tzv. plížení). Ze struktury je dále vidět, že je možno nastavit zesílení P a integrační složku I na rychlostním regulátoru. Dále následuje momentové omezení a výpočet žádané hodnoty kotevního proudu. V dalším kroku se nastaví proudový regulátor. Blok precontrol je blok, který řeší oblasti nespojitých proudů. Tento obvod tedy zajišťuje, že se nemusí neustále měnit parametry regulátoru podle stavu motoru. Na *Obr. 7* je struktura budicího obvodu a jak je vidět z obrázku, tak taky obsahuje bloky precontrol.



Obr. 6 Bloková struktura kotevního obvodu



Obr. 7 Bloková struktura budícího obvodu měniče

Dále se pomocí parametrizační jednotky dá nastavit celá řada ochran:

- Proti přetížení
- Proti mžikovému nadproudu
- Derivační ochrana du/dt
- SCR ochrana polovodičových pojistek
- Ochrana izolace elektroniky

Jednou z nejdůležitějších ochran je ochrana proti ztrátě proudu v budícím obvodu, která má za úkol, aby nedošlo k úplnému odbuzení motoru, což by mělo za následek extrémní nárůst otáček.

Měnič je dále vybaven pěti segmentovým displejem, který zobrazuje různé měřené hodnoty, poruchová nebo výstražná hlášení. LCD displej zobrazuje mnoho různých informací jako:

- Hodnotu okamžitou a požadovanou rychlosti motoru
- Velikost proudu a napětí kotvy

- Efektivní hodnotu sdruženého napětí mezi fázemi
- Řízení momentu

Dále pomocí displeje můžeme zjistit různá diagnostická hlášení. Těchto hlášení je okolo stovky a jako nejdůležitější lze uvést:

- Indikace oteplení
- Detekce selhání ochrany polovodičových pojistek
- Proudové přetížení
- Zastavení motoru

V neposledním řadě nám displej ještě umožňuje sledovat alarmová a chybová hlášení.

Alarmové hlášení je zobrazeno ve formátu A (alarmové) a chybové hlášení ve formátu F (chybové). Můžeme se setkat např. s těmito hlášeními:

- Překročení maximální dovolené teploty motoru
- Selhání komutace nebo nadproudu
- Překročení maximálních otáček
- Podpětí/přepětí
- Pokles napájecího napětí kotvy

Při uvádění měniče do provozu je na začátku nutné nastavit parametr P051. Po přidělení dané hodnoty např. 40 se povolí přístup, kterým můžeme následně nastavovat či měnit dané hodnoty. Pokud nastavíme parametru P051 hodnotu 21, tak se začne generovat tovární nastavení a všechny předešlé zadané údaje jsou přepsány.

Při nastavování se rozlišují dva druhy parametrů:

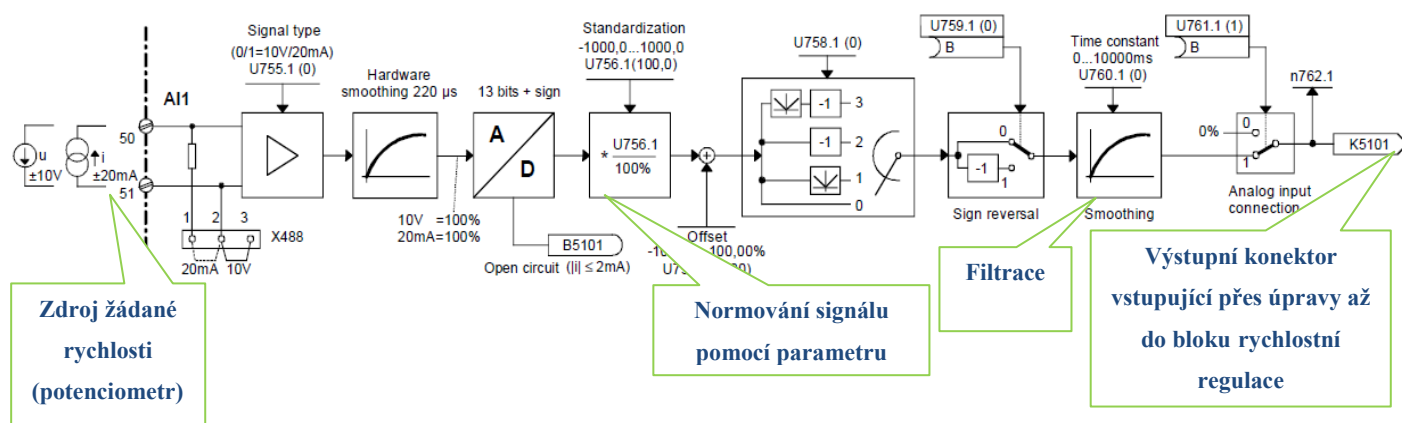
- **Parametr r** – Tímto parametrem nenastavujeme hodnoty, ale pouze sledujeme jiné parametry nebo slouží také k diagnostice. Například parametrem r012 zobrazíme hodnotu teploty motoru, r015 zobrazí indikaci napětí sítě, r018 indikace řídicího úhlu atd.
- **Parametr P** – Tímto parametrem nastavujeme přímo hodnoty např. štítkové hodnoty motoru.

Důležité je definování parametru motoru, které se provádí pomocí parametrů P100 až P139. Těmito parametry provedeme nastavení jmenovitého kotevního proudu motoru (P100), jmenovitého napětí kotvy (P101), minimálního budicího proudu motoru (P103), maximálních provozních otáček (P108) a tepelné časové konstanty motoru (P114).

2.4 Popis blokových struktur měniče

2.4.1 Popis rychlostní struktury

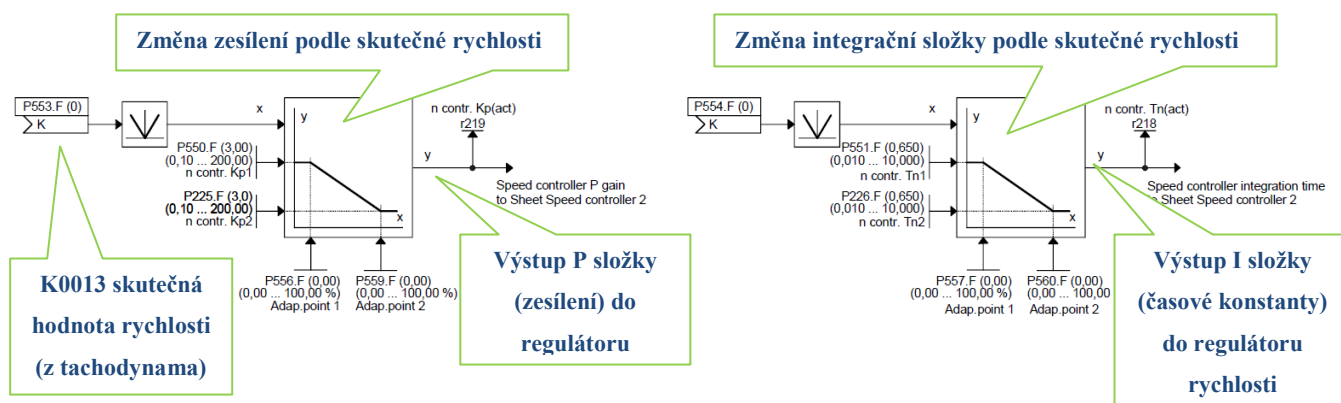
Tato regulace vychází ze základního řízení rychlostní smyčky s podřazenou smyčkou proudu. Při této regulaci se na vstup přivádí žádaná hodnota rychlosti, která se porovnává se skutečnou hodnotou z čidla rychlosti (tachodynamu). Proudová smyčka, zde ovlivňuje dynamiku regulace rychlosti. Dále proudová smyčka kompenzuje velkou časovou konstantu a zajišťuje proudovou ochranu proti přetížení motoru. [1] [3]



Obr. 8 Bloková struktura zadávání žádané rychlosti (analogový vstup)

Jak je vidět z Obr. 8, tak na vstup struktury přivádíme žádanou hodnotu rychlosti, a to buď z napěťového zdroje v rozsahu ± 10 V nebo z proudového zdroje v rozsahu 0 – 20 mA. V dalším kroku je přivedený signál převeden z analogové hodnoty na digitální a je normován podle daných parametrů. Signál je dále vyfiltrován a přiveden do bloku regulace rychlosti.

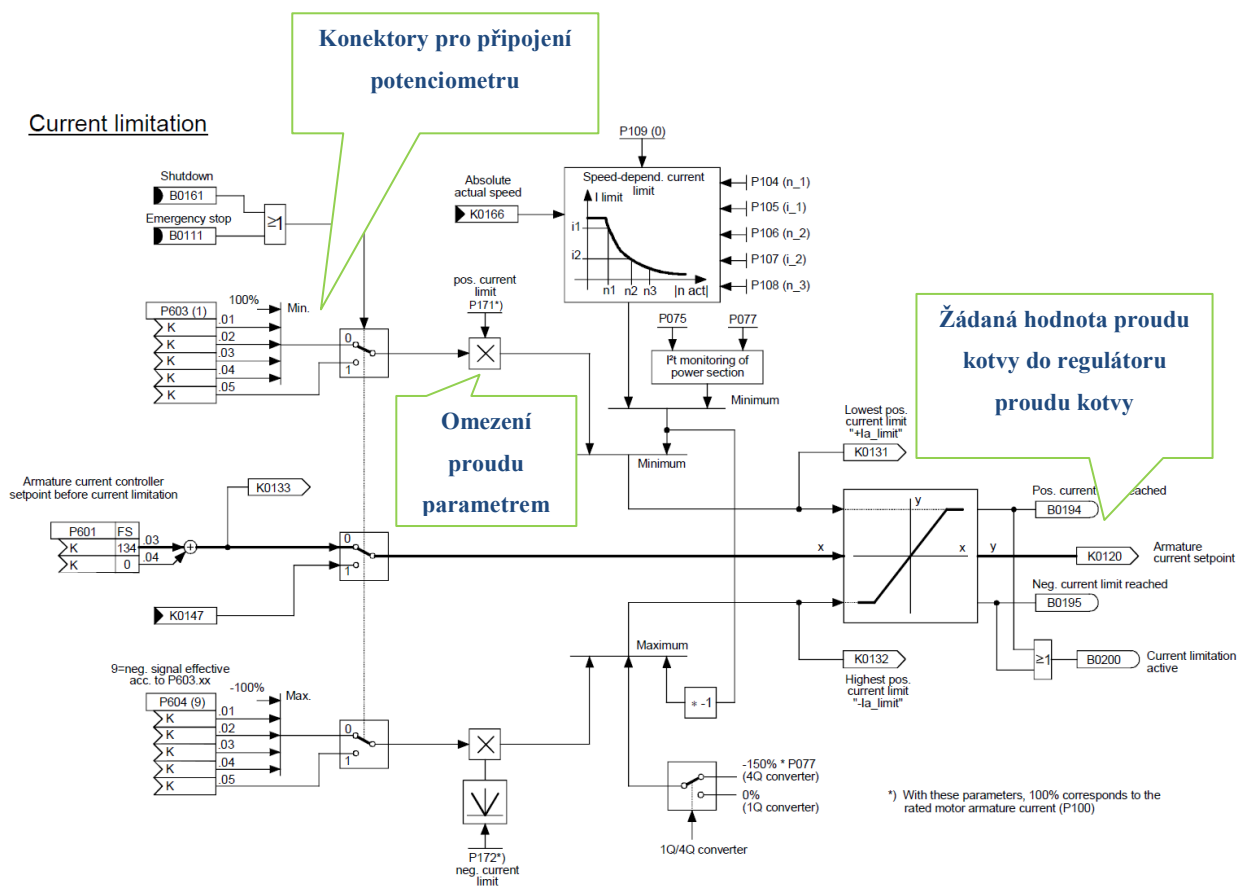
Na Obr. 9 je znázorněná adaptace rychlosti, kde na vstupu máme skutečnou rychlost z tachodynamu. Je zde vidět, že zde proběhne nastavení složky P a I zvlášť. Dojde zde ke změně zesílení P složky podle skutečné rychlosti a také dojde ke změně integrační složky I podle skutečné rychlosti. Dále jsou signály přivedeny na vstupy rychlostního regulátoru, jak je naznačeno na Obr. 10.



Obr. 9 Bloková struktura nastavení rychlostní adaptace

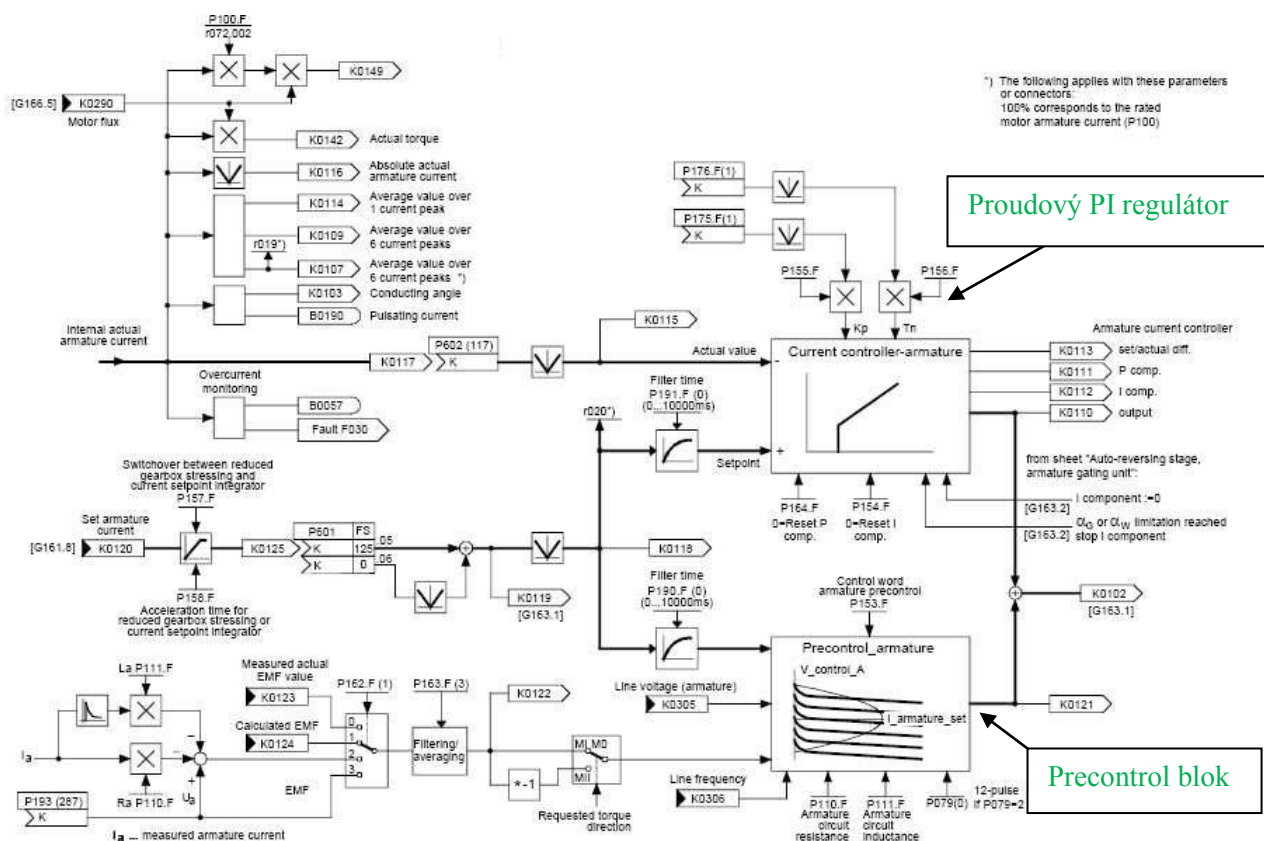
2.4.2 Popis proudové struktury

Před nastavením proudového regulátoru dojde ještě k proudovému omezení, jak je blokově naznačeno na Obr. 11.



Obr. 11 Struktura proudového omezení

Proudové omezení slouží jako ochranná funkce měniče. Pomocí této funkce dojde k zajištění, aby nedošlo k překročení maximálního proudu. K překročení maximálního proudu může dojít při velké strmosti nárůstu napětí kotvy. V případě, že měnič nemá funkci proudového omezení, musíme zajistit, aby nárůst napětí kotvy byl pozvolný. Rychlost regulace proudového omezení souvisí s parametry pohonu (τ_m , M_{PM} , i_{max} , ϕ). Na Obr. 12 je zobrazena struktura pro nastavení proudové smyčky. Tento regulátor je PI typu, takže dojde k nastavení žádané hodnoty zesílení P a žádané hodnoty integrační složky I. V této struktuře je dále k vidění blok Precontrol, který zajišťuje funkci v oblasti nespojitých proudů. Výhodou tedy je, že motor může pracovat, jak ve funkci spojitých proudů, tak i nespojitých proudů. [1] [3]



Obr. 12 Struktura nastavení proudové smyčky

2.5 Srovnání měniče Siemens Sinamics 6RA80 a 6RA70

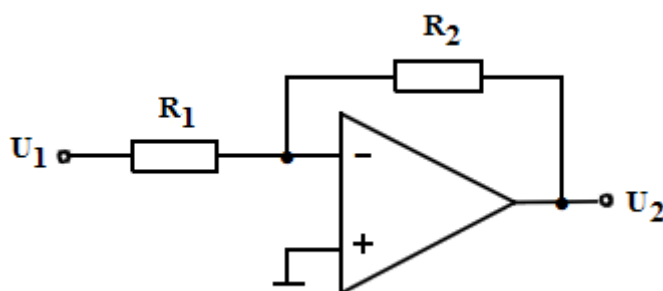
Hlavní změny měniče 6RA80 oproti staršímu typu 6RA70 jsou:

- Řídicí jednotka se dá zvolit s DriveCliO rozhraním, a tím pádem použít s komponenty Sinamics.
- Pro nastavování slouží již jen software Starter.
- Volné funkční bloky + možnost použití DCC.
- Variabilní zvolení budících můstků.
- Komunikační port ProfiBus DP ve standardní variantě a možnost připojení přes Profinet.
- Napájení elektroniky již jen 24 V stejnosměrných.
- Pro výkonový návrh možnost použití software Sizer.

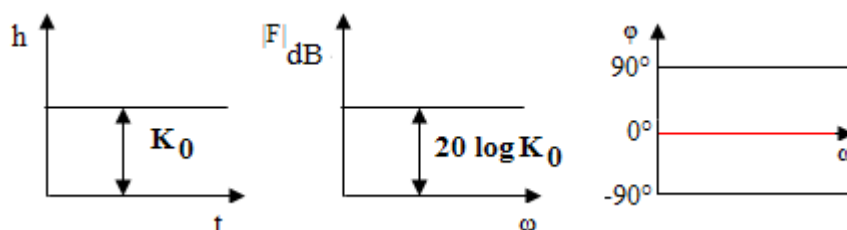
3 Charakteristiky nejdůležitějších členů v regulačních obvodech

3.1 Proporcionální člen – P člen

Tento člen vytváří signál, který je úměrný vstupnímu signálu bez časového zpoždění. Mezi takové členy patří např. odporový dělič nebo tachodynamo. Diferenciální rovnice tohoto členu má tvar $y = K_0 \cdot x$ a operátorový přenos $F(p) = K_0$. Jak je vidět z Obr. 14, tak frekvenční charakteristika obsahuje pouze reálnou složku, a proto je výstupní hodnota přímo rovná konstantnímu zesílení K_0 . Fáze u tohoto členu je nulová.



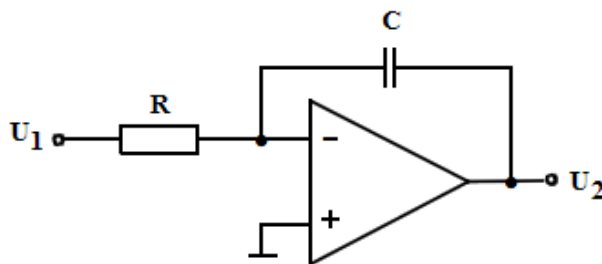
Obr. 13 Základní zapojení proporcionálního členu



Obr. 14 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika P členu

3.2 Integrovní člen – I člen

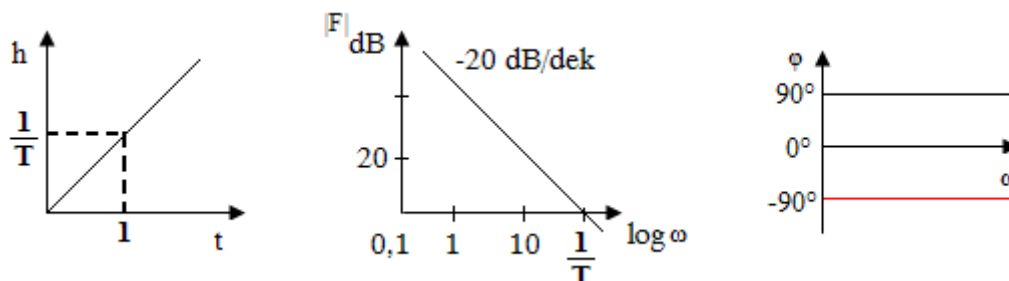
Integrovní člen je člen, který se nejčastěji v pohonech vyskytuje jako regulátor nebo jako součást regulované soustavy. Časová doba integrátoru τ je doba, za kterou se absolutní hodnota na vstupu rovná výstupní hodnotě napětí při skokové změně vstupního napětí.



Obr. 15 Základní zapojení integračního členu

Operátorový přenos: $F(p) = \frac{1}{pT}$

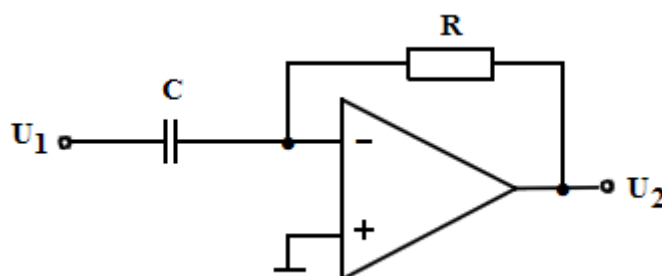
Frekvenční přenos: $F(j\omega) = \frac{1}{j\omega T}$



Obr. 16 Přechodová, amplitudová a frekvenční charakteristika I členu

3.3 Derivační člen – D člen

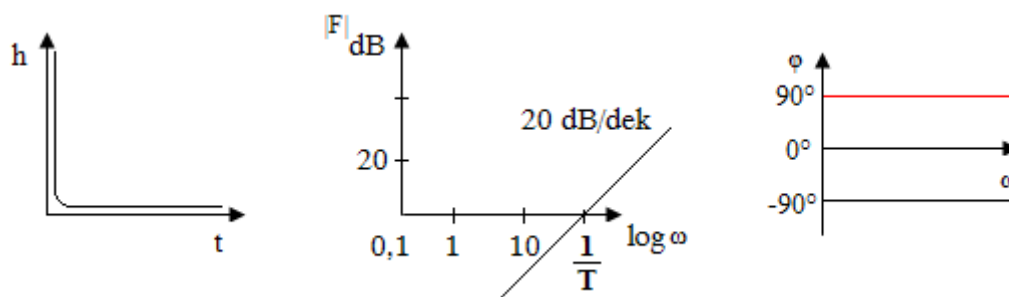
Derivační člen se v regulačních pohonech moc nevyskytuje. Derivační člen je kvůli nevhodnému fázovému posunutí ve zpětné vazbě náchylný ke kmitání. U tohoto členu se při velkém zesílení a velkých kmitočtech uplatňuje šum.



Obr. 17 Základní zapojení derivačního členu

Operátorový přenos: $F(p) = pT$

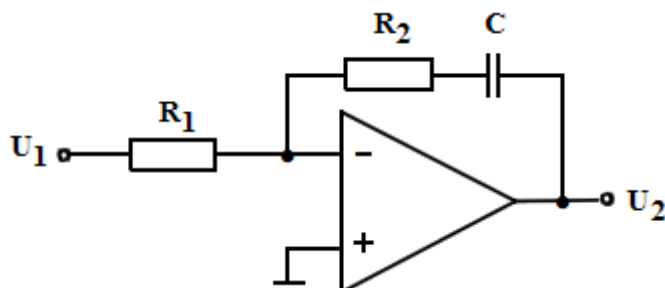
Frekvenční přenos: $F(j\omega) = j\omega T$



Obr. 18 Přechodová, amplitudová a frekvenční charakteristika D členu

3.4 Proporcionálně integrační člen- PI člen

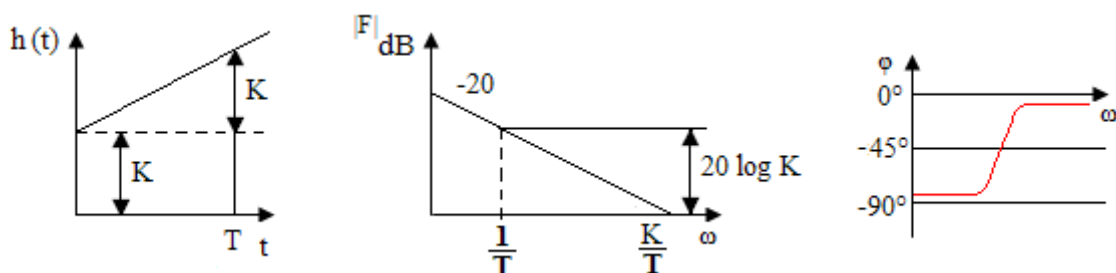
Tento člen je nejpoužívanějším členem, který se vyskytuje jako regulátor v regulačních obvodech elektrických pohonů. Jak je vidět z Obr. 19, tak zesílení PI členu se nastavuje pomocí odporu R_1 a R_2 a časová konstanta τ pomocí R_2 a C .



Obr. 19 Základní zapojení proporcionálně integračního členu

Operátorový přenos: $F(p) = K \frac{(1+pT)}{pT}$

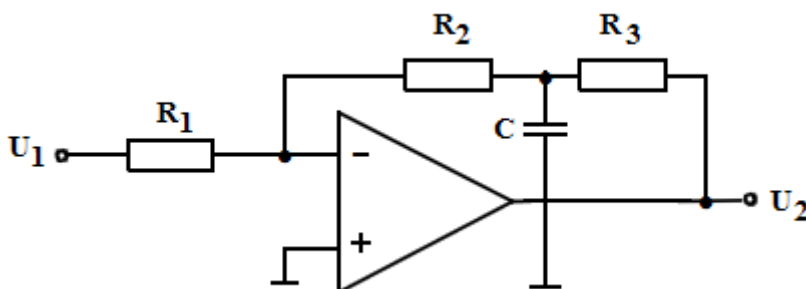
Frekvenční přenos: $F(j\omega) = K \frac{(1+j\omega T)}{j\omega T}$



Obr. 20 Přejchodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PI členu

3.5 Proporcionálně derivační člen - PD člen

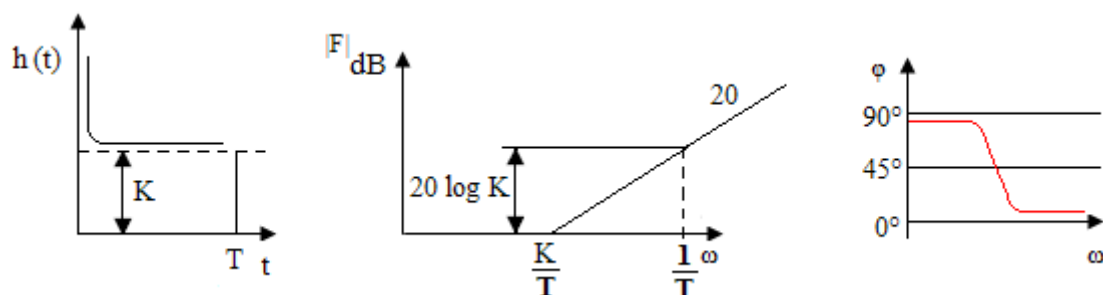
Proporcionálně derivační člen se v regulačních pohonech moc nevyskytuje. Ve většině případů má přednost před derivačním členem člen integrační.



Obr. 21 Základní zapojení proporcionálně derivačního členu

Operátorový přenos: $F(p) = K(1 + pT)$

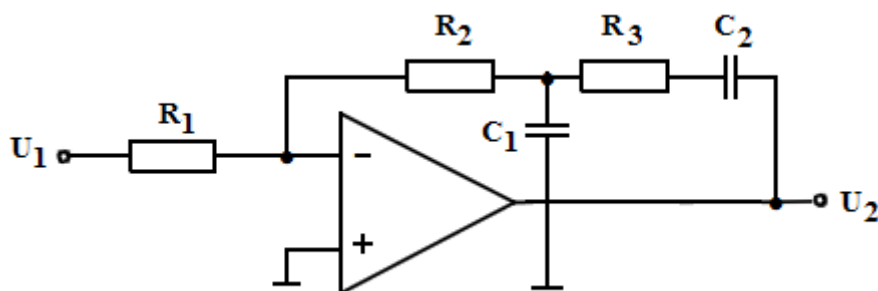
Frekvenční přenos: $F(j\omega) = K(1 + j\omega T)$



Obr. 22 Přebodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PD členu

3.6 Proporcionálně integračně derivační člen - PID člen

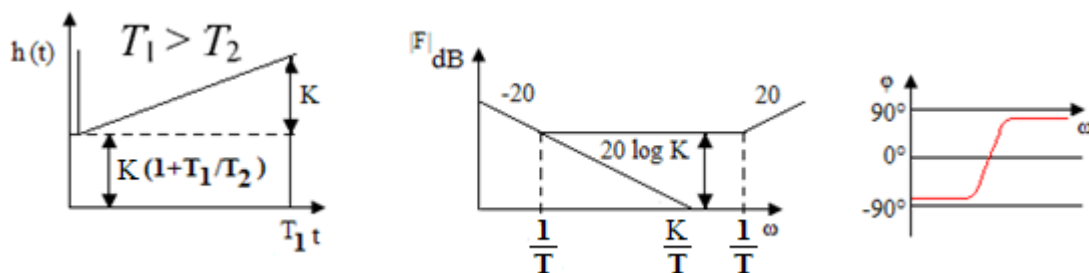
Proporcionálně integračně derivační člen je často se vyskytující regulátor v regulačních obvodech elektrických pohonů.



Obr. 23 Základní zapojení Proporcionálně integračně derivační člen

Operátorový přenos: $F(p) = K \frac{(1+pT_1) \cdot (1+pT_2)}{1+pT_1}$

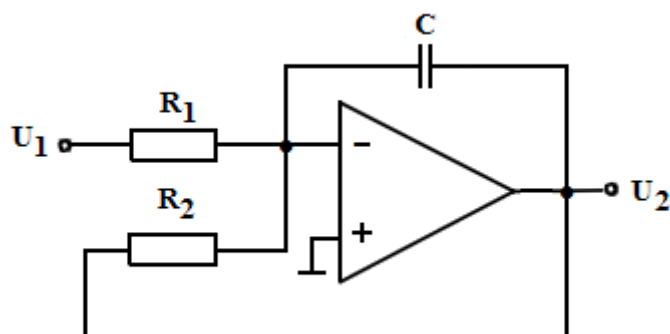
Frekvenční přenos: $F(j\omega) = K \frac{(1+j\omega T_1) \cdot (1+j\omega T_2)}{1+j\omega T_1}$



Obr. 24 Přebodová, amplitudová a frekvenční charakteristika PID členu

3.7 Aperiodický člunek 1. řádu (setrvačný člen)

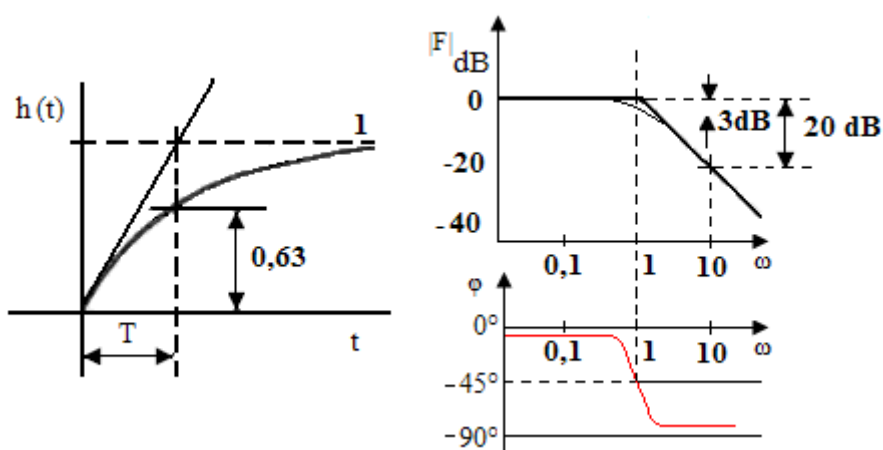
Tento člunek se v regulačních obvodech elektrických pohonů vyskytuje nejčastěji. V regulačních strukturách je většinou charakterizován jako budící obvod, kotevní obvod stejnosměrného motoru. V náhradních schématech motoru je tento člunek charakterizován jako sériové spojení indukčnosti L a odporu R . Realizace aperiodického členu je na Obr. 25, z kterého je vidět, že je realizován jako integrátor s přímou zápornou zpětnou vazbou.[2]



Obr. 25 Základní zapojení aperiodického členu

Operátorový přenos R-L obvodu:
$$F(p) = \frac{K}{1+pT} = \frac{1/R}{1+p(\frac{L}{R})}$$

Frekvenční přenos R-L obvodu:
$$F(j\omega) = \frac{K}{\sqrt{1+(\omega T)^2}} e^{-\arctg(\omega T)}$$

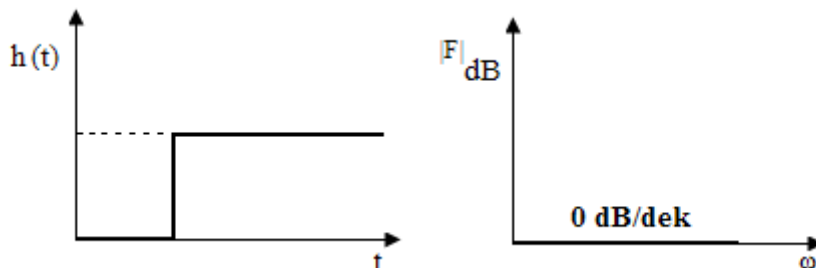


Obr. 26 Přechodová, amplitudová a frekvenční charakteristika aperiodického člunku

3.8 Člen s dopravním zpožděním

Tento člen je nejčastěji charakterizován dynamickým chováním tyristorového měniče.

Operátorový přenos: $F(p) = \frac{1}{e^{pT}}$

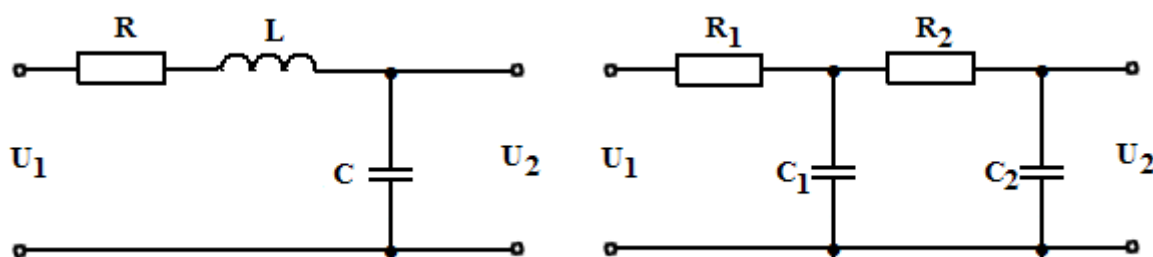


Obr. 27 Přejímová, amplitudová charakteristika členu s dopravním zpožděním

3.9 Setrvačný člen 2. řádu – kmitavý článek

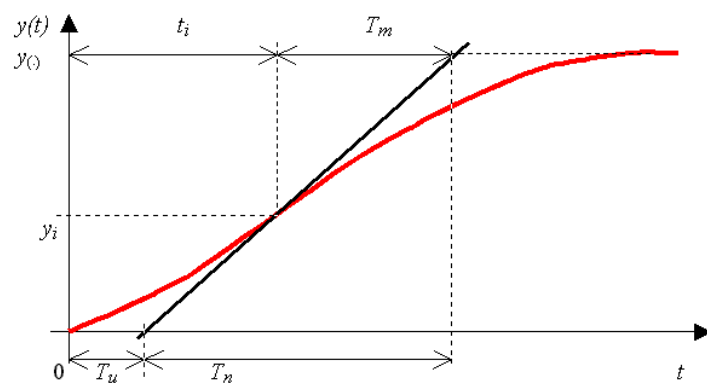
U tohoto členu mohou vlivem tlumení δ nastat tři různé stavy:

- $\delta > 1$ - v tomto případě má rovnice dva reálné kořeny, díky této vlastnosti se výsledná rovnice dá převést na spojení dvou zpožďujících členů 1. řádu
- $\delta = 1$ - v tomto případě je reálný kořen dvojnásobný a vede k aperioditě
- $\delta < 1$ - v tomto případě dvou komplexně sdružených kořenů se zápornou reálnou částí je výsledný průběh kmitavý

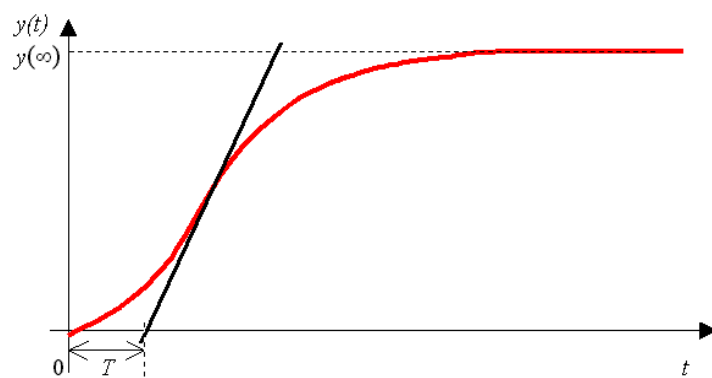


Obr. 28 Základní zapojení setrvačného členu 2. Řádu

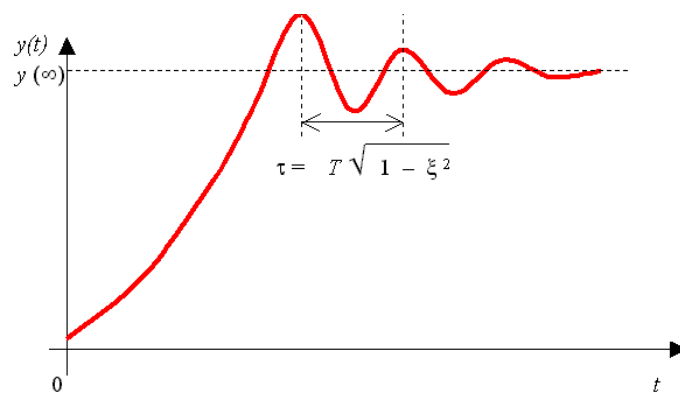
Operátorový přenos: $F(p) = \frac{K}{1+2p\delta T+p^2T^2}$



Obr. 29 Přebodová charakteristika - aperiodicky přetlumená



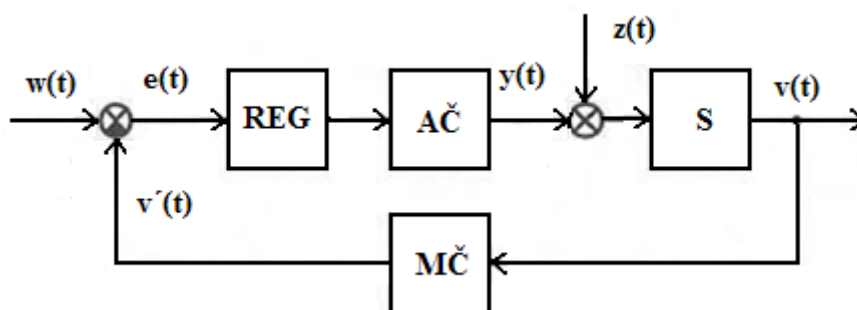
Obr. 30 Přebodová charakteristika - mez aperiodicity



Obr. 31 Přebodová charakteristika - kmitavě tlumená

4 Základní řízení a regulace mechatronických systémů

V této části je pod slovem řízení myšleno ovládání a regulace různých regulačních systémů. Pod pojmem ovládání si můžeme představit něco jako řízení, při kterém jsou prováděny logické operace s případnou indikací stavu pohonu na příkaz obsluhy nebo nadřazeného řídicího systému. Při této operaci jsou pevně dány matematické charakteristiky, které jsou určeny zapojením a parametry elektrických obvodů bez zpětné vazby. Pod druhým pojmem regulace se skrývá řízení, při němž regulovaný pohon pracuje na mechanických charakteristikách. Mechatronické systémy se používají v aplikacích, kde chceme nepřetržitě regulovat výstupní signál. [4]



Obr. 32 Blokové schéma regulačního obvodu

- S - regulovaná soustava
- AČ - akční člen
- MČ - měřicí člen
- REG - regulátor

Základní signály

$w(t)$ – žádaná hodnota dané regulované soustavy

$e(t)$ – regulační odchylka

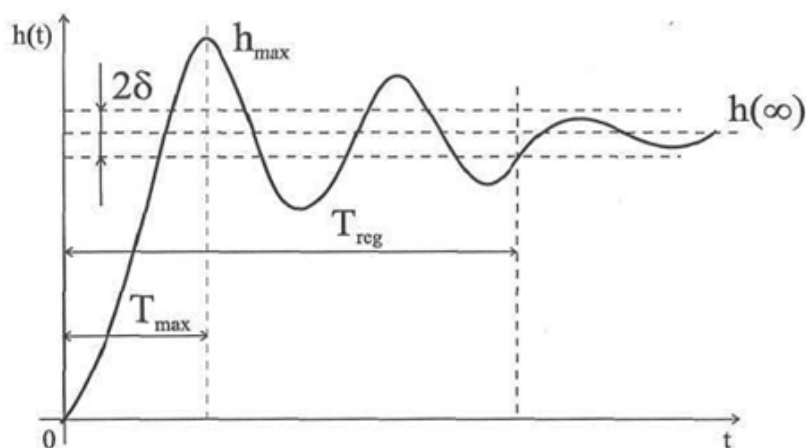
$y(t)$ – akční zásah

$z(t)$ – poruchová veličina

$v'(t)$ – skutečná hodnota regulované soustavy

4.1 Kvalita regulačního systému

Kvalita regulačního systému je dána průběhem přechodného děje regulované veličiny, která je určena skokovou změnou na vstupu obvodu. Přechodová charakteristika může mít několik průběhů. Tyto průběhy jsou např. monotónní nebo s překmitem a následným tlumením. Z výsledné charakteristiky se dále určuje doba regulace podle daných kritérií. [4]



Obr. 33 Přechodová charakteristika

δ – toleranční pásmo

$h(\infty)$ - ustálená hodnota

T_{\max} , T_{reg} – čas dosažení maximální hodnoty, doba regulace

$$\text{Překmit } \sigma = \frac{h_{\max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100$$

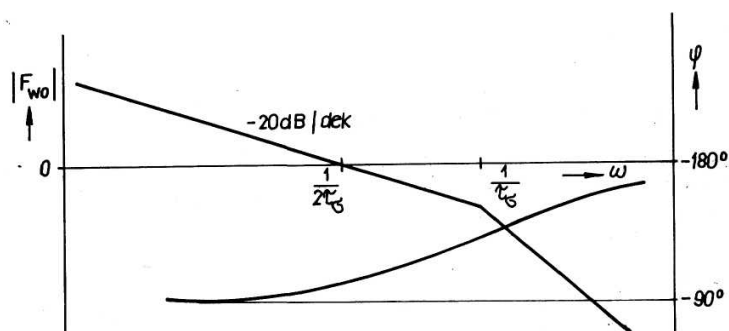
4.2 Metoda optimálního modulu

Standardní tvar přenosu otevřené smyčky řízení obsahuje astatismus 1. řádu.

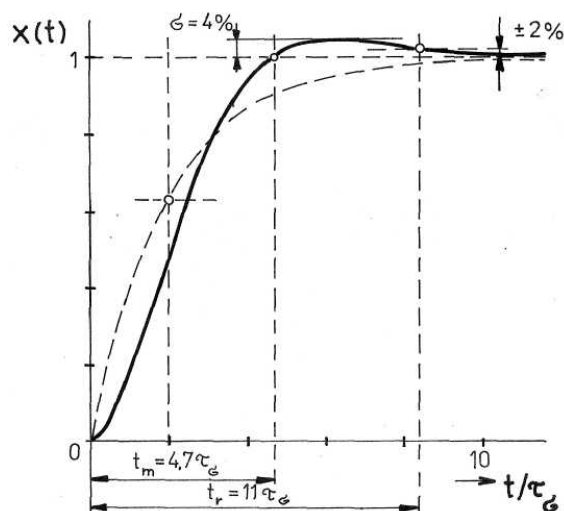
$$F_o = \frac{1}{2T_\sigma \cdot (1 + pT_\sigma)} \quad (4.1)$$

Přenos uzavřené smyčky odpovídá zpožďujícímu členu 2. řádu s tlumením 0,707. Tomuto tlumení následně odpovídá fázová bezpečnost 65°. Přenos uzavření smyčky pro řízení je:

$$F_w = \frac{1}{1 + 2T_\sigma p + 2T_\sigma p^2} \quad (4.2.)$$



Obr. 34 LAFFCH otevřeného obvodu dle metody optimálního modulu (OM)



Obr. 35 Přechodová charakteristika dle metody optimálního modulu (OM)

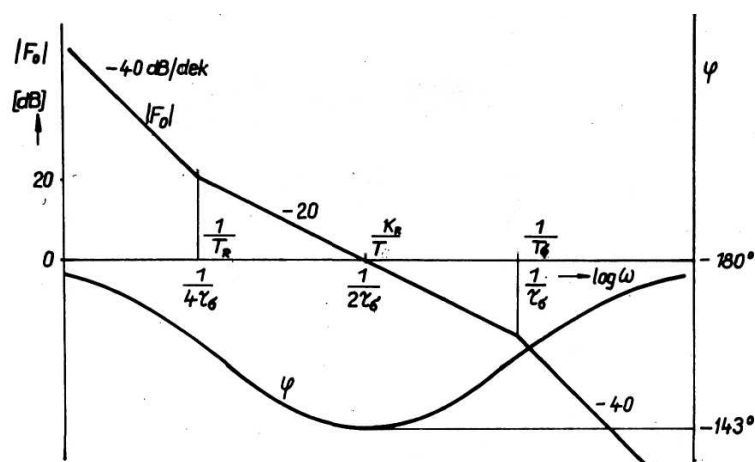
4.3 Metoda symetrického optima

Standardní tvar přenosu otevřené smyčky řízení obsahuje astatismus 2. řádu.

$$F_o = \frac{1 + 4T_\sigma p}{8T_\sigma^2 p^2 \cdot (1 + pT_\sigma)} \quad (4.3.)$$

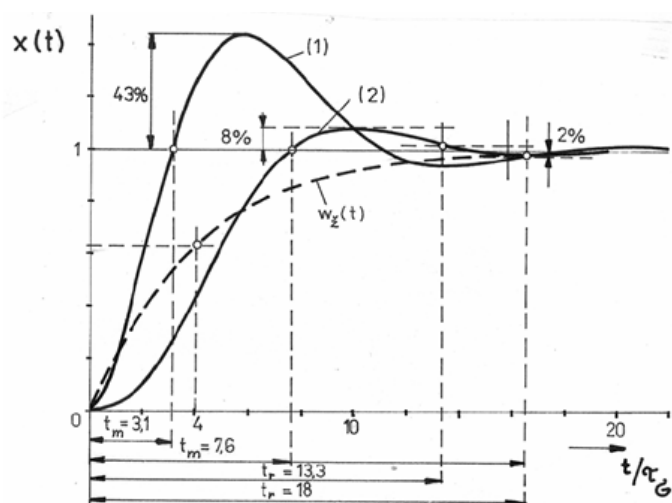
Přenos uzavření smyčky pro řízení je:

$$F_w = \frac{1 + 4T_\sigma p}{1 + 4T_\sigma p + 8T_\sigma^2 p^2 + 8T_\sigma^3 p^3} \quad (4.4.)$$



Obr. 36 LAFFCH otevřeného obvodu dle metody symetrického optima (SO)

Z Obr. 36 je vidět, že charakteristika je symetrická k frekvenci řezu $1/2T_\sigma$. Malá časová konstanta se odrazí ve velkém překmitu (43%), která může být omezena zařazením filtrem s přenosem $F_f = \frac{1}{1+4T_\sigma p}$. Tento člen zajišťuje zmenšení překmitu a dobu regulace podle přechodové charakteristiky na Obr. 37.



Obr. 37 Přechodová charakteristika dle metody symetrického optima (SO)

5 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Stejnosměrné motory s cizím buzením jsou motory, které se výhradně používají v regulačních pohonech v nejrůznějších aplikacích. Ve většině případů bývají ve spojení s polovodičovými měniči. U tohoto typu motoru je výhodou nezávislost řídících vstupů budicího vinutí a vinutí kotvy motoru. Vzhledem k této vlastnosti se zjednodušuje návrh regulačních struktur a zároveň dosahujeme snadné říditelnosti pohonu.

Stejnosměrné motory pracují obvykle při vysokých otáčkách a nízkém momentu, což je pro některé dané aplikace nevýhodné (např. robotika). Proto se v takových případech do motoru aplikuje převodovka. Výhodou takovýchto pohonů je kompaktnost. V dnešní době bývají tyto motory ještě vybaveny čidlem polohy nebo rychlosti. U takovýchto motorů je následně docíleno toho, že budicí magnetický tok je kolmý ve směru proudu kotvy. [4]

5.1 Matematický model stejnosměrného motoru s cizím buzením

Pro stejnosměrný motor na *Obr. 38* platí několik základních rovnic v ustáleném stavu:

a) V časové oblasti

$$U_a = U_i + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$U_i = c\Phi\omega$$

$$M_m = c\Phi i_a$$

$$M_m - M_{PM} = J_c \frac{d\omega}{dt}$$

kde

U_a – napájecí napětí kotvy

U_i – indukované napětí

$c\Phi$ – konstrukční konstanta stroje a hodnota magnetického toku

ω – úhlová rychlost otáčení rotoru

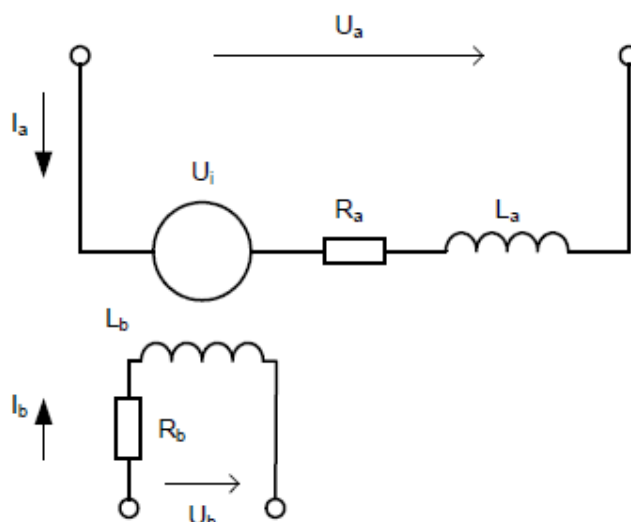
b) Laplacova transformace

$$U_{a(p)} = U_{i(p)} + R_a i_{a(p)} + L_a p i_{a(p)}$$

$$U_{i(p)} = c\Phi\omega(p)$$

$$M_{m(p)} = c\Phi i_a(p)$$

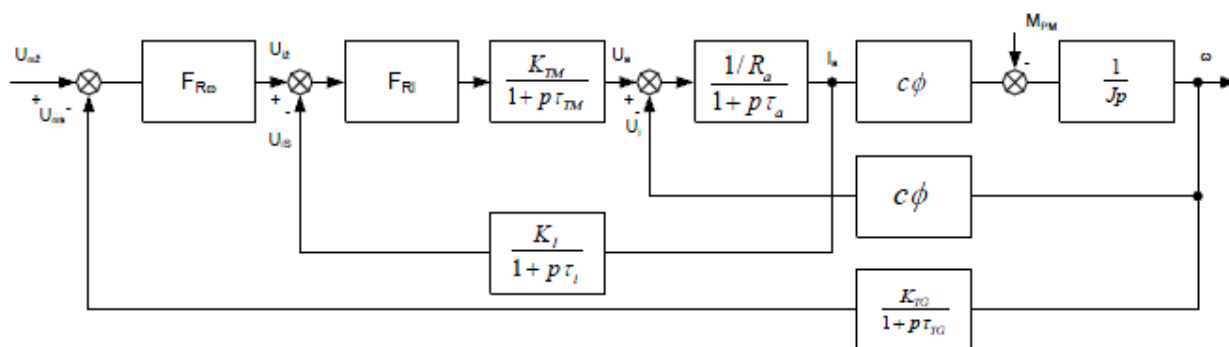
$$M_{m(p)} - M_{PM(p)} = J_c p \omega(p)$$



Obr. 38 Schéma zapojení stejnosměrného cize buzeného motoru

5.2 Regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

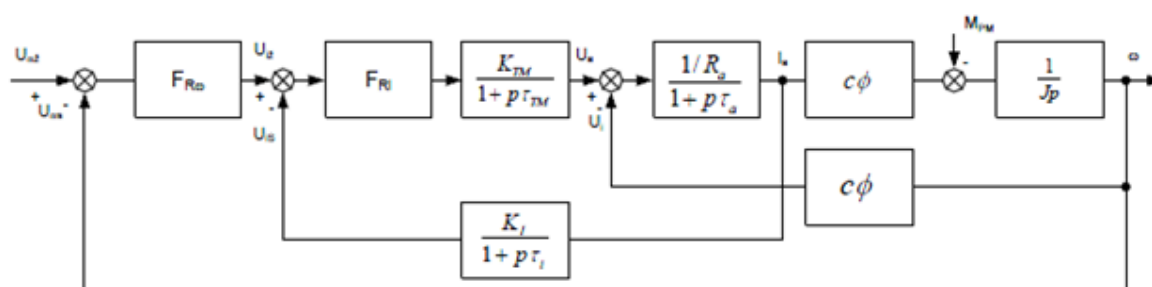
Tato regulační struktura je využívána u pohonů se středním a velkým výkonem. U těchto typů motorů by proud kotvy neměl překročit dvojnásobek jmenovité hodnoty, což je dané přítomností komutátoru motoru. Z toho plyne, že jeho dynamické chování výrazně ovlivňuje průběh regulace rychlosti. Na vstup struktury, která je na Obr. 39 se přivádí rychlostní odchylka tj. rozdíl žádané a skutečné hodnoty rychlosti. Rychlostní regulátor, který je většinou PI typu, generuje na svém výstupu žádanou hodnotu U_{Iz} , kterou zadává do regulátoru proudu. Tuto hodnotu můžeme omezit výše uvedeným dvojnásobkem jmenovitého proudu, čímž dojde k omezení i skutečné hodnoty proudu. Na vstupu regulátoru proudu se od žádané hodnoty proudu odečítá hodnota proudu skutečného. Následně z regulátoru proudu vystupuje řídicí napětí do generátoru impulzů. Toto napětí je pak úměrné napětí na výstupu měniče, které je připojeno na kotvu motoru. [7]



Obr. 39 Blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

5.3 Analýza a syntéza regulačního obvodu rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

U tohoto zapojení tvoří vnitřní regulační smyčka smyčku podřazenou s regulací rychlosti. Téhle regulační struktura odpovídá blokové schéma, které je znázorněno na Obr. 40. Z blokového schématu je vidět, že oproti schématu regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu (viz. Obr. 39) neobsahuje čidlo rychlosti. U takto zapojené struktury se neuplatní přenos rychlostního čidla, pokud neuvažujeme výstupní signál dále filtrovat. Tato bloková struktura je dále využívána při tvorbě laboratorního přípravku. [1]



Obr. 40 Blokové schéma regulace rychlosti motoru s podřazenou smyčkou proudu bez rychlostního čidla

5.4 Zadané hodnoty pro výpočet regulace motoru

Hodnoty jsou převzaty z Obr. 59, který je v přílohách. Některé hodnoty jsou již vypočteny a uvedeny zde:

$$P_n = 15 \text{ kW}, U_{an} = 440 \text{ V}, I_{an} = 37,5 \text{ A}, n = 2800 \text{ min}^{-1}, c\Phi = 1,35 \text{ Vs}, J_c = 0,27 \text{ kgm}^2$$

$$\text{Kotevní obvod: } R_a = 1,17\Omega \quad \tau_a = 12,7 \text{ ms}$$

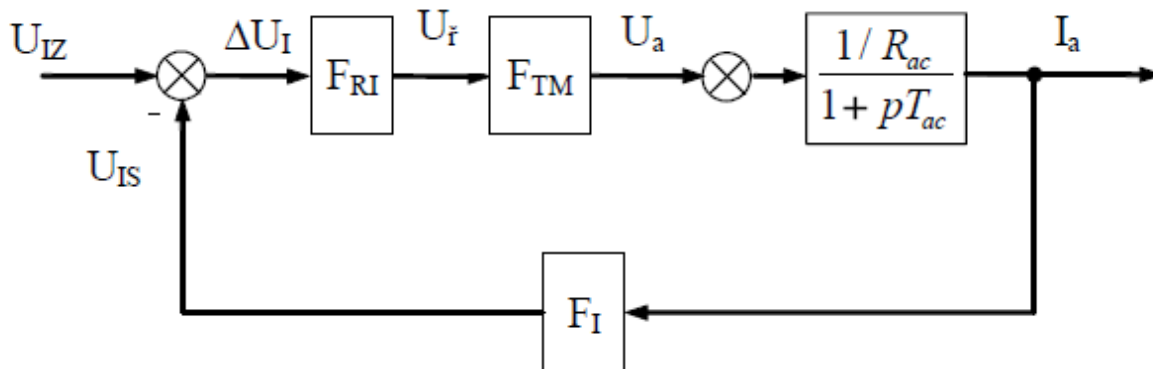
$$\text{Tyristorový měnič: } K_{TM} = 54 \quad \tau_{TM} = 1,67 \text{ ms}$$

$$\text{Čidlo proudu: } K_I = \frac{1}{3} \quad \tau_I = 1 \text{ ms}$$

$$\text{Čidlo rychlosti: } K_{TD} = 0,063$$

6 Výpočet regulátoru proudu pomocí optimálního modulu a symetrického optima

Pro výpočet proudového regulátoru motoru byla struktura motoru zjednodušená a je znázorněná na Obr. 41.



Obr. 41 Zjednodušené blokové schéma pro výpočet regulátoru proudu

6.1 Výpočet parametrů metodou optimálního modulu:

Základní vzorec pro přenos optimálního modulu:

$$F_{OM} = \frac{1}{2T_{\sigma} \cdot (1 + pT_{\sigma})} \quad (6.1.)$$

Přenos otevřené smyčky:

$$F_{OS} = \frac{K_{TM} \cdot K_A \cdot K_I}{(1 + pT_{\sigma}) \cdot (1 + pT_a)} \quad (6.2.)$$

$$T_{\sigma} = T_{TM} + T_I = 0,00167 + 0,001 = 2,67 \text{ ms} \quad (6.3.)$$

Přenos regulátoru pro metodu optimálního modulu OM:

$$F_{R(OM)} = \frac{F_{OM}}{F_{SI}} = \frac{\frac{1}{2_{(P)}T_{\sigma}(1 + T_{\sigma}(P))}}{\frac{K_{TM}K_A \cdot K_I}{(1 + T_{A(P)})(1 + T_{\sigma}(P))}} = \frac{T_A}{2T_{\sigma}K_{TM} \cdot K_I K_A} \cdot \frac{1 + T_{A(P)}}{T_{A(P)}} \quad (6.4.)$$

$$K_{RI} = \frac{T_A}{2T_{\sigma}K_{TM} \cdot K_I K_A} = \frac{12,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 54 \cdot 0,85} = \frac{0,0127}{0,0808} = 0,157 \quad (6.5.)$$

$$T_{RI} = T_A = 12,7 \text{ ms} \quad (6.6.)$$

- Z výpočtu jde vidět, že se jedná o regulátor typu PI

6.2 Výpočet parametrů metodou symetrického optima:

Základní vzorec pro přenos symetrického optima:

$$F_{SO} = \frac{1 + 4pT_{\sigma}}{8p^2 \cdot T_{\sigma}^2 \cdot (1 + pT_{\sigma})} \quad (6.7.)$$

Přenos otevřené smyčky:

$$F_{OS} = \frac{K_{TM} \cdot K_A}{(1 + pT_{\sigma}) \cdot (1 + pT_a)} \quad (6.8.)$$

Přenos regulátoru pro metodu symetrického optima SO:

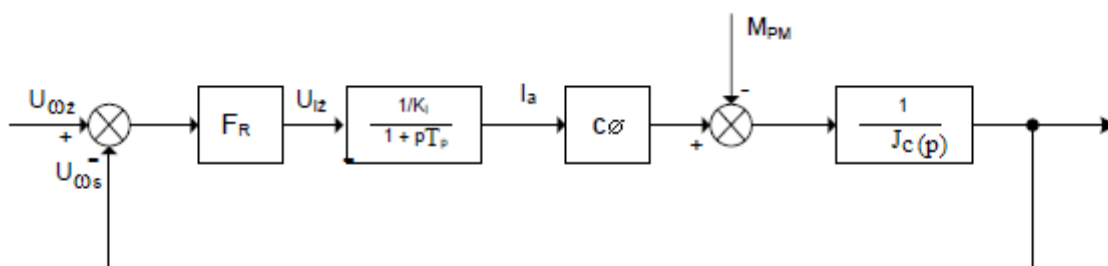
$$\begin{aligned} F_{R(SO)} &= \frac{F_{SO}}{F_{SI}} = \frac{\frac{1 + 4T\sigma_{(P)}}{8_{(P^2)}T\sigma^2(1 + T\sigma_{(P)})}}{\frac{K_I K_{TM} K_A}{(1 + T_{A(P)})(1 + T\sigma_{(P)})}} = \frac{(1 + 4T\sigma_{(P)})(1 + T_{A(P)})}{2T\sigma K_I K_{TM} K_A} = \\ &= \frac{T_A}{2T\sigma \cdot K_{TM} \cdot K_I \cdot K_A} \cdot \frac{1 + 4T\sigma_{(P)}}{4T\sigma_{(P)}} \end{aligned} \quad (6.9.)$$

$$K_{RI} = \frac{T_A}{2T\sigma \cdot K_{TM} \cdot K_I \cdot K_A} = \frac{12,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 54 \cdot 0,85} = \frac{0,0127}{0,0808} = 0,155 \quad (6.10.)$$

$$T_{RI} = 4T\sigma = 4 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3} = \mathbf{10,68 \text{ ms}} \quad (6.11.)$$

- Z výpočtu jde vidět, že se jedná o regulátor typu PI

7 Výpočet regulátoru rychlosti pomocí optimálního modulu a symetrického optima



Obr. 42 Zjednodušené blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

7.1 Výpočet parametrů metodou optimálního modulu:

Základní vzorec pro přenos optimálního modulu:

$$F_{OM} = \frac{1}{2pT_\sigma(1 + pT_\sigma)} \quad (7.1.)$$

Přenos soustavy:

$$F_{S\omega} = \frac{1}{K_I(1 + T_{P(P)})} \cdot \frac{1}{J_{C(P)}} = \frac{K_{S\omega}}{(1 + T\sigma_{(P)})_{(P)}} \quad (7.2.)$$

$$T\sigma = T_p = 2(T_{TM} + T_I) = 2(0,00167 + 0,001) = 5,34ms \quad (7.3.)$$

Kde zesílení soustavy je:

$$K_{S\omega} = \frac{1}{K_I} \cdot \frac{c\phi}{J_c} \quad (7.4.)$$

Přenos regulátoru pro metodu optimálního modulu OM:

$$F_{R(OM)} = \frac{F_{OM}}{F_{SI}} = \frac{\frac{1}{2_{(P)}T\sigma(1 + T\sigma_{(P)})}}{\frac{K_{S\omega}}{(1 + T\sigma_{(P)})_{(P)}}} = \frac{1}{2K_{S\omega}T\sigma} = \frac{K_I \cdot J_c}{2 \cdot C\Phi \cdot T\sigma} \quad (7.5.)$$

$$K_{R\omega} = \frac{K_I \cdot J_c}{2 \cdot C\Phi \cdot T\sigma} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 0,27}{2 \cdot 1,35 \cdot 5,34 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,09}{0,0144} = 6,25 \quad (7.6.)$$

Z výpočtu jde vidět, že se jedná o regulátor typu P

7.2 Výpočet parametrů metodou symetrického optima:

Základní vzorec pro přenos symetrického optima:

$$F_{SO} = \frac{1 + 4pT_{\sigma}}{8p^2 \cdot T_{\sigma}^2 \cdot (1 + pT_{\sigma})} \quad (7.7.)$$

Aplikace věty o součtu malých časových konstant:

$$T_{\sigma} = T_p = 4 \cdot (T_{TM} + T_I) = 4 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3} = 10,68 \text{ ms} \quad (7.8.)$$

Přenos regulátoru pro metodu optimálního modulu SO:

$$F_{R(SO)} = \frac{F_{SO}}{F_{SI}} = \frac{\frac{1 + 4T_{\sigma(P)}}{8_{(P^2)}T_{\sigma}^2(1 + T_{\sigma(P)})}}{\frac{K_{S\omega}}{(1 + T_{\sigma(P)})_{(P)}}} = \frac{1 + 4T_{\sigma(P)}}{4T_{\sigma(P)}} \cdot \frac{1}{2K_{S\omega}T_{\sigma}} \quad (7.9.)$$

$$K_{R\omega} = \frac{K_I \cdot J_C}{2 \cdot C\Phi \cdot T_p} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 0,27}{2 \cdot 1,35 \cdot 10,68 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,09}{0,02883} = 3,12 \quad (7.10.)$$

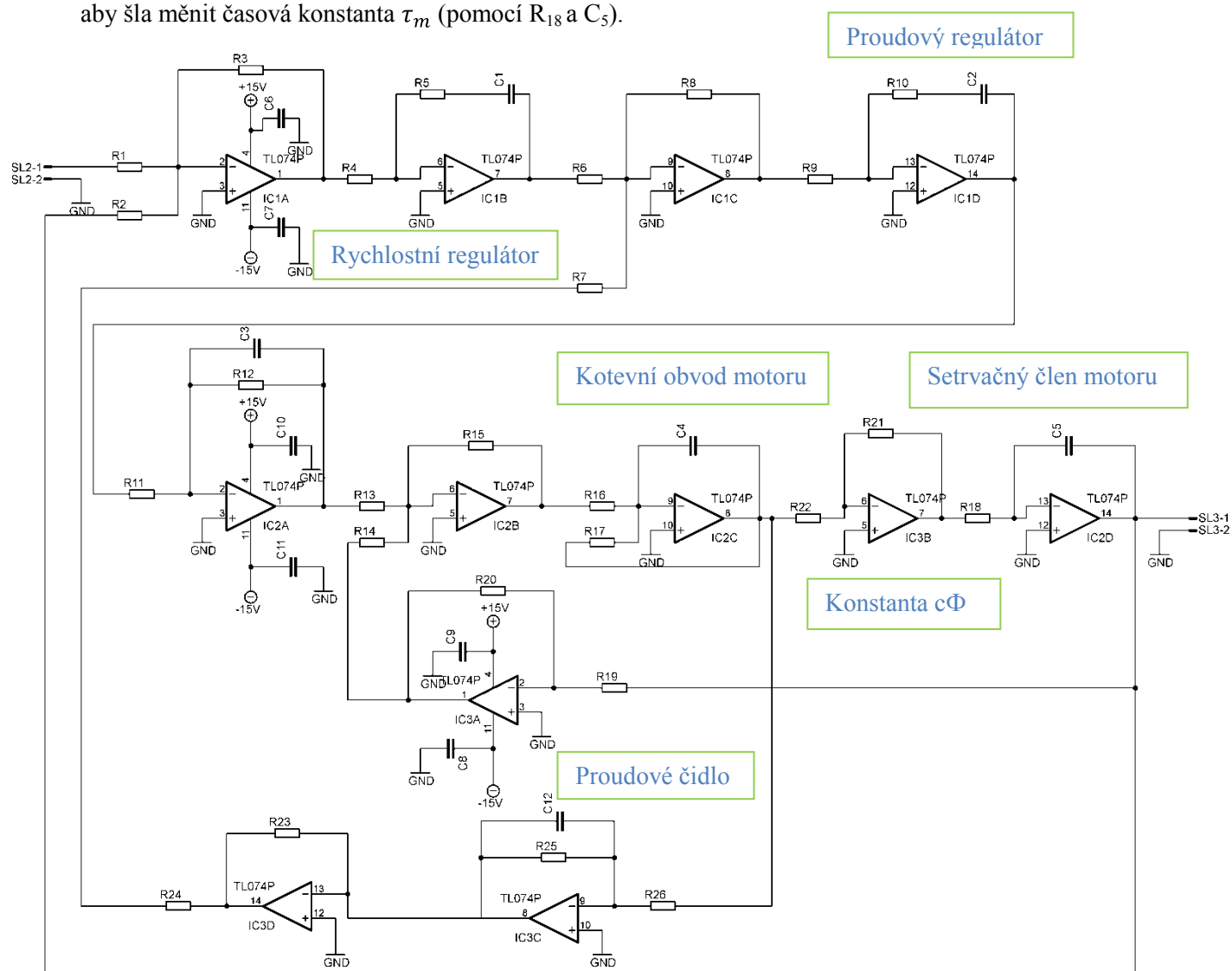
$$T_{R\omega} = 4 \cdot T_{\sigma} = 4 \cdot 10,68 \cdot 10^{-3} = 42,72 \text{ ms} \quad (7.11.)$$

Z výpočtu jde vidět, že se jedná o regulátor typu PI

8 Popis laboratorního přípravku

Jedná se o model stejnosměrného cizí buzeného motoru, který je vyroben pomocí operačních zesilovačů, jak je naznačeno na Obr. 43. Tomuto analogovému zapojení odpovídá blokové zapojení na Obr. 40. V zapojení je použit operační zesilovač řady TL084, který obsahuje ve vnitřní struktuře čtyři operační zesilovače. Proto jak je vidět z Obr. 43, tak pouze každý čtvrtý operační zesilovač je napájen symetrickým zdrojem $\pm 15\text{ V}$. [6]

Pomocí odporů R_4 , R_5 a kondenzátoru C_1 se provádí nastavení rychlostního regulátoru (R_4 , R_5 - nastavení zesílení a R_5 , C_1 - nastavení časové konstanty). Místo součástek jsou na laboratorním přípravku použity precizní patice, aby bylo možno měnit jak zesílení regulátoru, tak i časovou konstantu. Výměnné patice jsou dále použity i místo součástek u proudového regulátoru (nastavení zesílení R_9 , R_{10} a časová konstanta R_{10} , C_2). Také u kotevního obvodu motoru jsou použity výměnné patice, aby šla měnit časová konstanta τ_a (nastavení pomocí R_{17} a C_4) a u setrvačného členu motoru, aby šla měnit časová konstanta τ_m (pomocí R_{18} a C_5).



Obr. 43 Schéma zapojení modelu stejnosměrného motoru s cizím buzením pomocí operačních zesilovačů

9 Simulace a měření na laboratorním přípravku

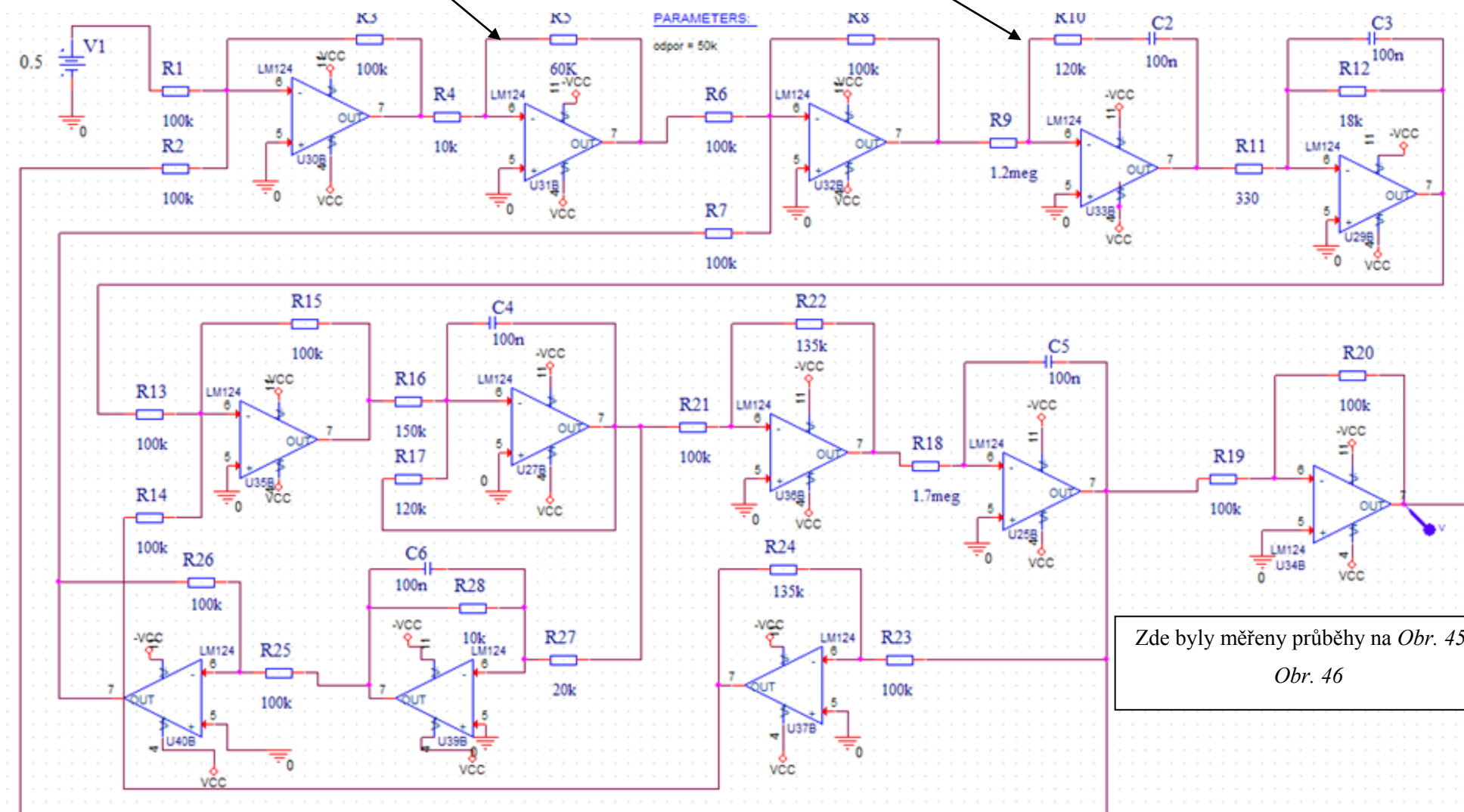
Před realizaci praktické části byly provedeny simulace v prostředí Orcad PSpice 16.5 a MATLAB-SIMULINK R2008b. Tyto simulace byly následně využity při realizaci modelu stejnosměrného motoru s cizím buzením pomocí operačních zesilovačů.

V prostředí OrCad PSpice byly využity součástky z knihoven ANALOG, SOURCE a OPAMP. Pro simulaci byl vybrán operační zesilovač TL084, který byl napájen ze symetrického zdroje napětí $\pm 15\text{ V}$. V simulacích bylo použito zapojení invertujících zesilovačů a bylo si proto nutné uvědomit, že se fáze za každým z těchto zesilovačů obrací o 180° , což sebou neslo výhody i nevýhody. S ohledem na dodržení správnosti polarity signálu byl v jedné ze zpětných vazeb za modelem proudového čidla použit invertor s přenosem -1 . V základní blokové struktuře regulace rychlosti (viz. *Obr. 39*) jsou použity rozdílové členy mezi skutečnou a žádanou hodnotou. V zapojení v Orcad_PSpice jsou použity součtové zesilovače, a to protože se využívá otočení fáze invertujících operačních zesilovačů.

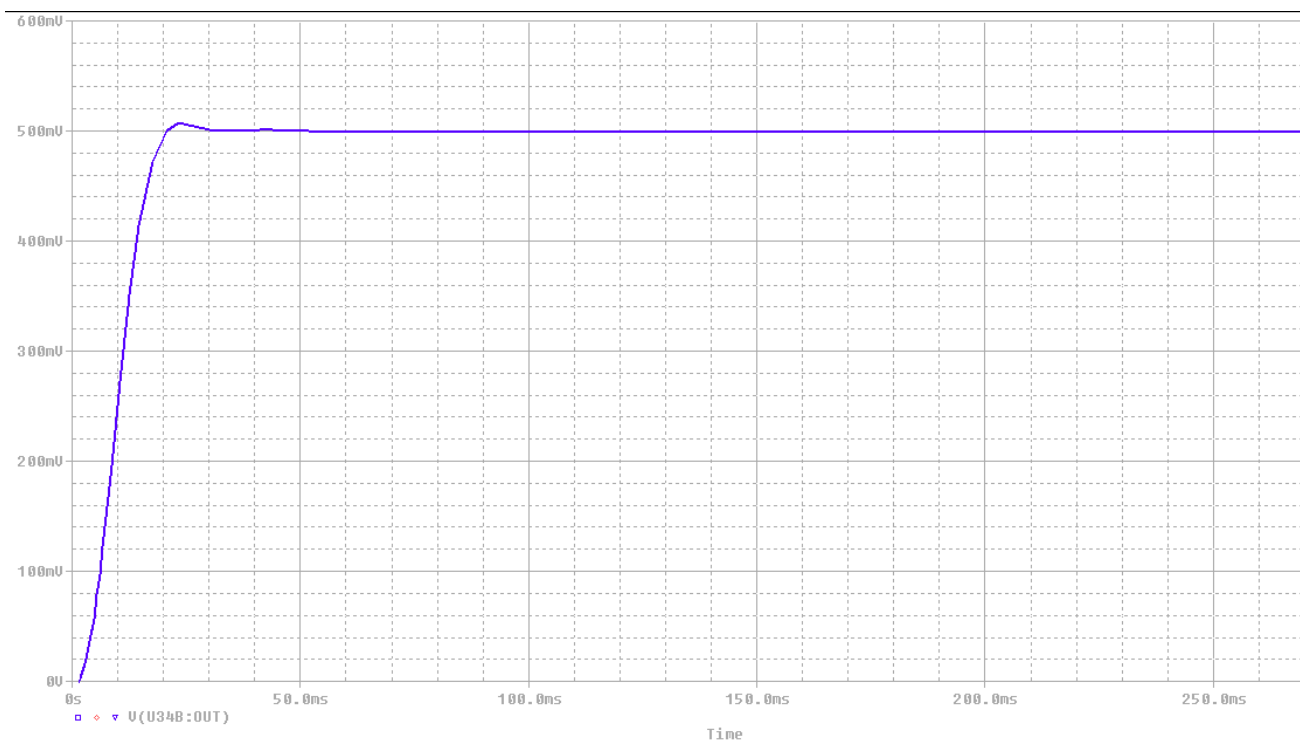
V druhé části byl model stejnosměrného motoru s cizím buzením také nasimulován pomocí prostředí MATLAB_SIMULINK. V tomto prostředí simulace motoru nebyl žádný problém, protože je to čistě matematický program. Motor je složen z bloků zdroje, Gain, Transfer Fcn a osciloskopu scope, jak je vidět na *Obr. 58* v příloze. Simulace v tomto programu byly provedeny pro kontrolu průběhů s OrCad_PSpice a pro zjištění stejné hodnoty napětí za jednotlivými bloky motoru. Napětí bylo zjišťováno z důvodu případné saturace u operačních zesilovačů, což by ovlivňovalo výsledné průběhy.

rychlostní regulátor P typu

proudový regulátor PI typu



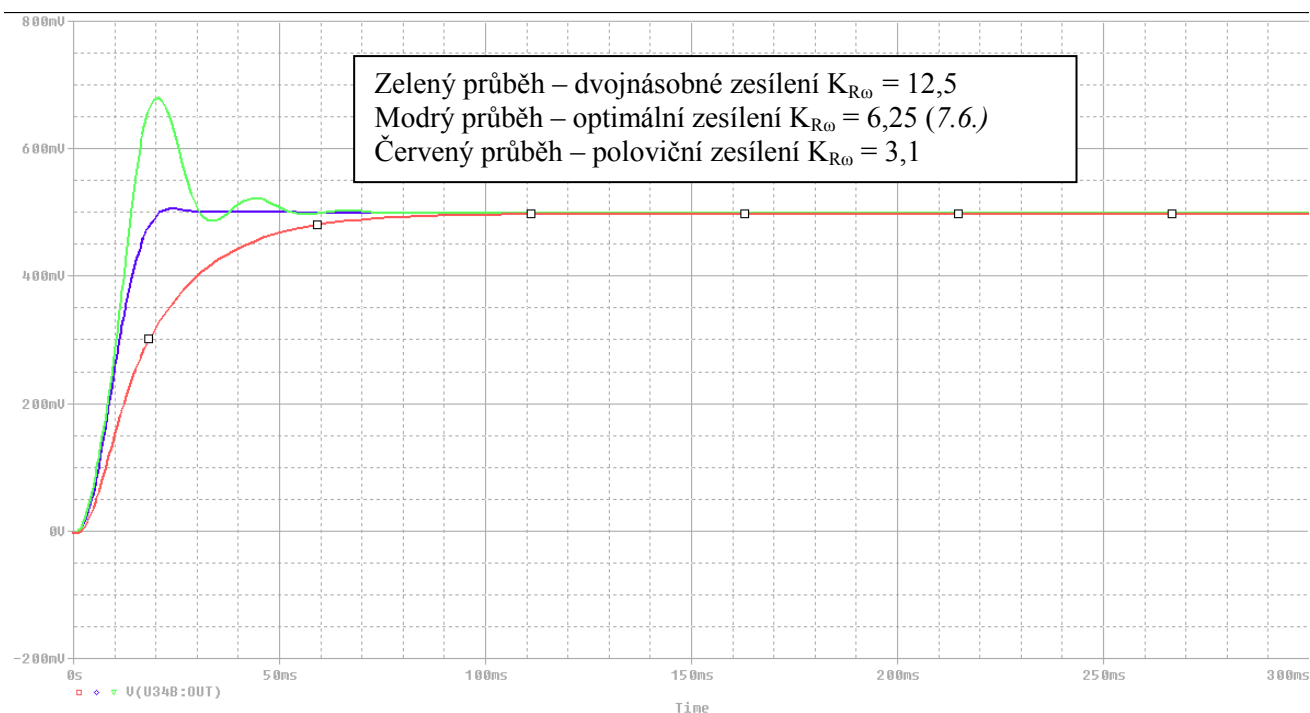
Obr. 44 Schéma zapojení modelu stejnosměrného cize buzeného motoru pomocí operačních zesilovačů s vypočtenými hodnotami pro OM



Obr. 45 Průběh přechodové charakteristiky stejnosměrného cizí buzeného motoru pro výpočet podle OM

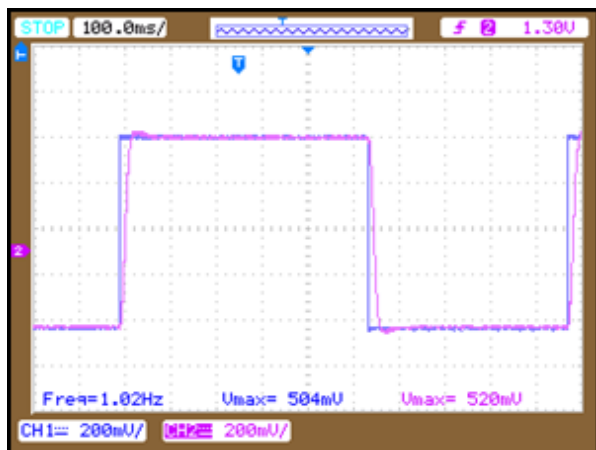
Na Obr. 45 je znázorněn průběh přechodové charakteristiky stejnosměrného motoru s cizím buzením. Průběh je měřen na výstupu zapojení, jak je naznačeno na Obr. 44. Zapojení je napájeno stejnosměrným zdrojem o hodnotě 500 mV, což odpovídá žádaným otáčkám, na kterých by se soustava měla ustálit. V tomto případě byly hodnoty proudového a rychlostního regulátoru vypočteny podle metody optimálního modulu, kde proudový regulátor vyšel typu PI a rychlostní typu P. Podle výpočtu vyšlo optimální zesílení rychlostního regulátoru $K_{R0} = 6,25$ (7.6.). Dále u této metody je dovolený maximální překmit $\delta = 4 \%$, což při nastavení vstupního napětí 500 mV odpovídá překmitu 20 mV. Jak je vidět z průběhu, tak překmit je 10 mV, čímž je podmínka splněna.

Na Obr. 46 jsou dále znázorněny tři průběhy pro různá zesílení rychlostního regulátoru. Modrý průběh je optimální nastavení se zesílením rychlostního regulátoru $K_{R0} = 6,25$ (viz. 7.6.). Zelený průběh odpovídá dvojnásobnému zesílení rychlostního regulátoru, což odpovídá zesílení $K_{R0} = 12,5$. Dále je ze zeleného průběhu viditelné, že čím větší zesílení bude nastaveno oproti optimálnímu, tím více bude soustava náchylná ke kmitání. Poslední červený průběh odpovídá polovičnímu zesílení rychlostního regulátoru, což odpovídá zesílení $K_{R0} = 3,1$. Z tohoto nastavení je viditelné, že dochází k tlumení výstupních průběhů.

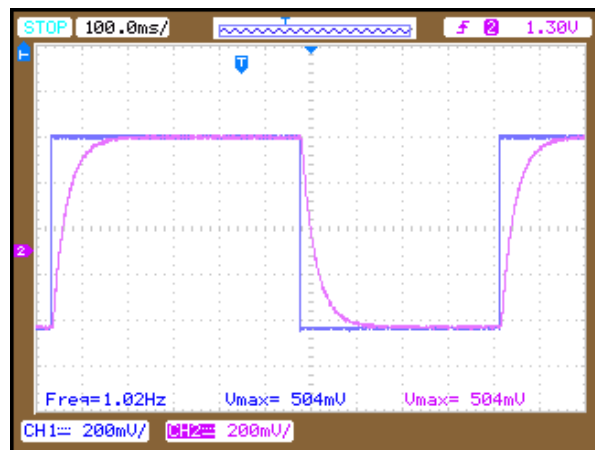


Obr. 46 Průběhy přechodových charakteristik pro různá zesílení rychlostního regulátoru podle výpočtu OM

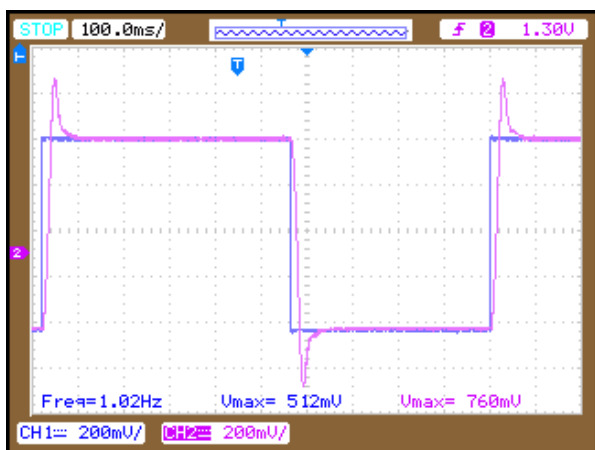
Průběhy naměřené na laboratorním přípravku



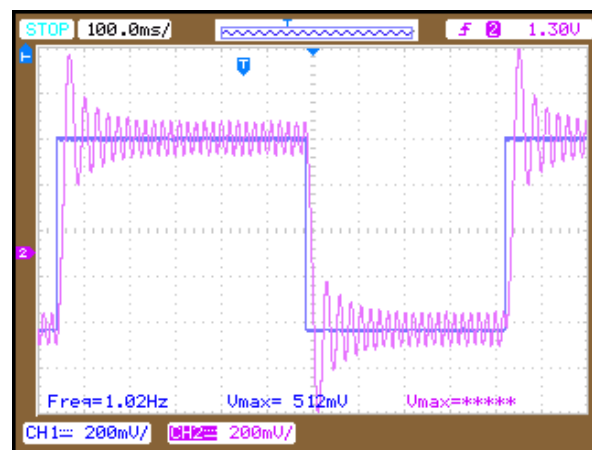
Obr. 47 Vypočtené hodnoty p regulátoru metodou OM $K_r = 6,25$



Obr. 48 Tlumený průběh - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_r = 3,1$



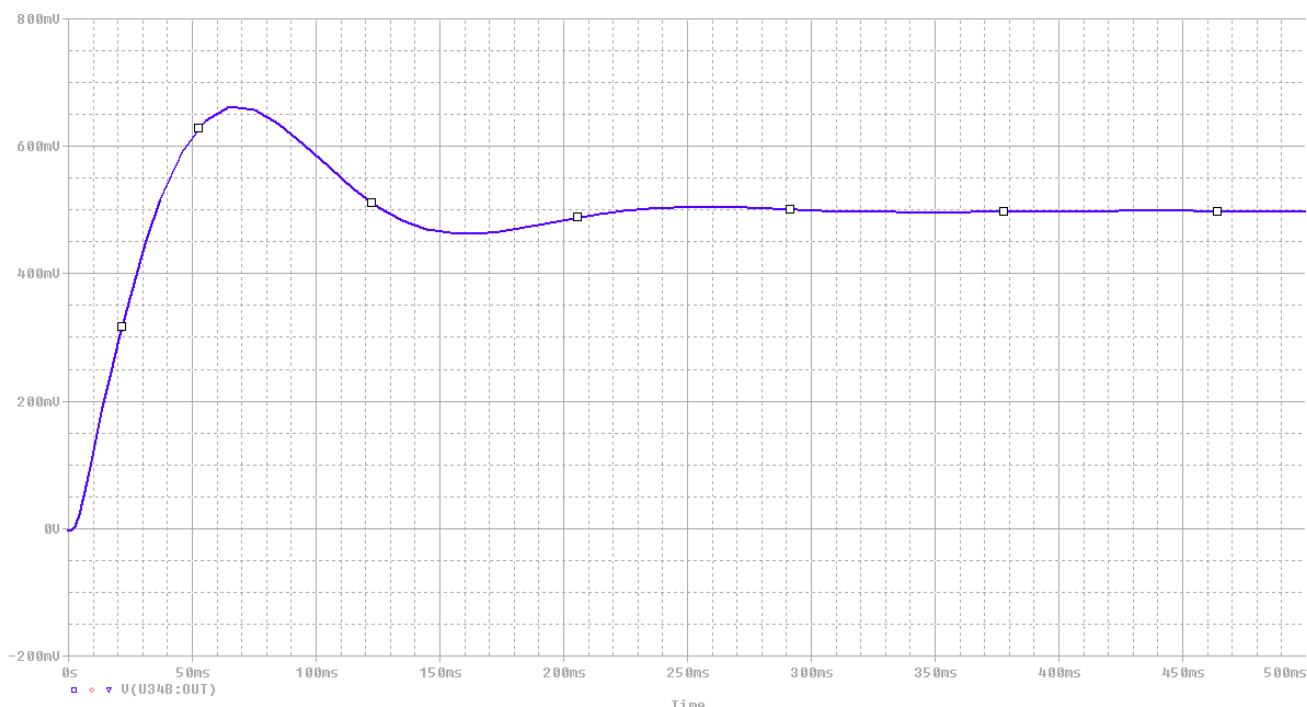
Obr. 49 Nevhodné nastavení - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_R=12,5$



Obr. 50 Kmitající průběh - nevhodně nastavený rychlostní regulátor $K_R=83$

- Modrý průběh – vstupní signál - jedná se o obdélníkový průběh o frekvenci 1 Hz a napětí 500 mV
- Růžový průběh – výstupní signál, který odpovídá výstupním otáčkám stejnosměrného cize buzeného motoru

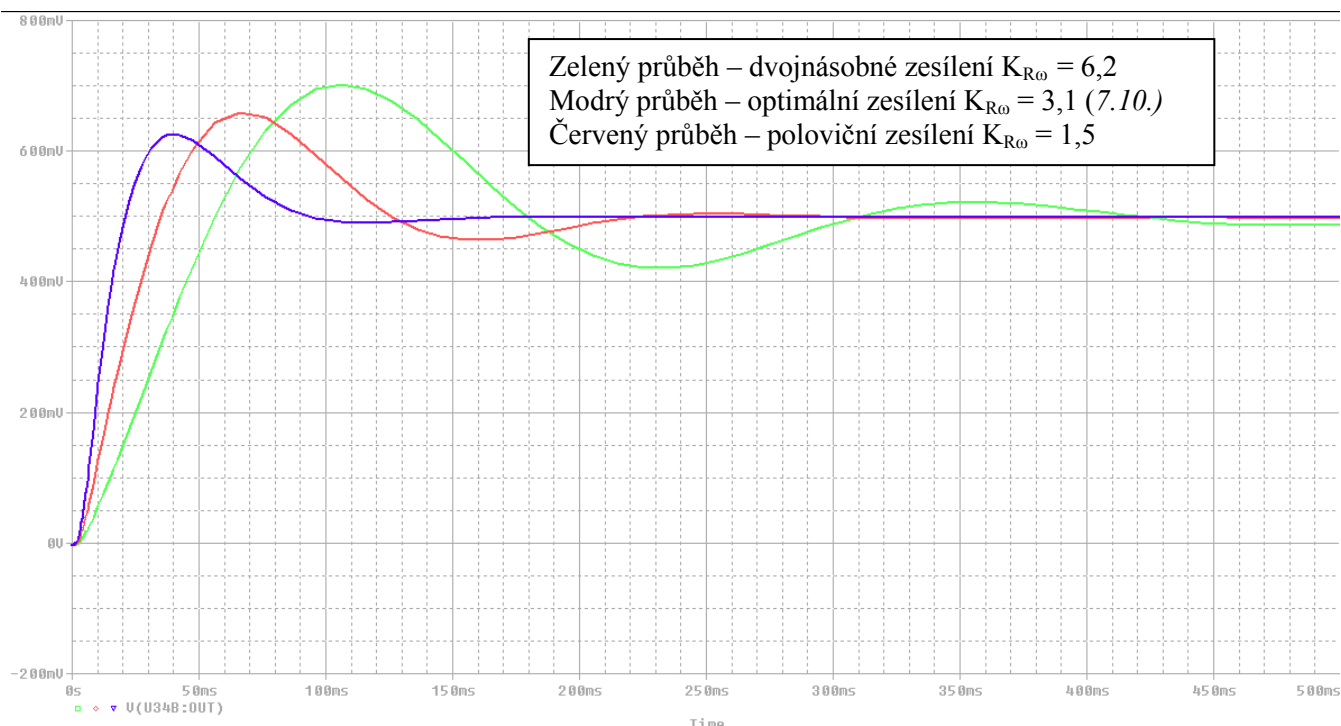
Na laboratorním přípravku, který byl vytvořen v rámci této diplomové práce, byly změřeny průběhy na modelu stejnosměrného cize buzeného motoru. Průběhy, které jsou zobrazeny na Obr. 47, 48, 49 a 50 odpovídají výstupním otáčkám motoru. Tyto průběhy se shodují se simulačními průběhy, které jsou zobrazeny na Obr. 46 výše. Nastavení hodnot regulátoru bylo provedeno podle výpočtu OM, podle kterého vyšel rychlostní regulátor typu P. Na Obr. 47 je znázorněn tlumený průběh přechodové charakteristiky, při které bylo nastaveno poloviční zesílení rychlostního regulátoru $K_{R0} = 3,1$. Dále na Obr. 48 je znázorněn optimální průběh podle vypočtených hodnot, což odpovídá zesílení regulátoru $K_{R0} = 6,25$ (7.6.). Jak je vidět z průběhu, tak je taky dodržen maximální povolený rozkmit $\delta = 4\%$. Na předposledním Obr. 49 bylo nastaveno dvojnásobné zesílení, což bylo $K_{R0} = 12,5$. Jak je vidět, tak u tohoto nastavení není dodržen maximální rozkmit 4%, což tedy odpovídá nevhodnému nastavení. Na posledním Obr. 50 je vidět kmitavý průběh výstupních otáček. Tento průběh je zapříčiněn velkým zesílením rychlostního regulátoru, které v tomto případě bylo nastaveno na $K_{R0} = 83$.



Obr. 52 Průběh přechodové charakteristiky modelu stejnosměrného cize buzeného motoru pro výpočet podle SO

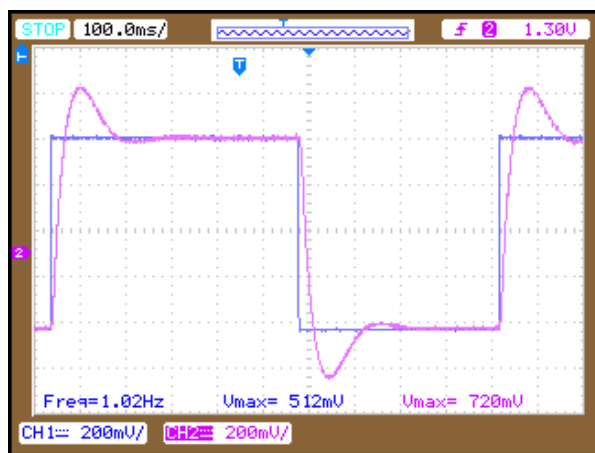
Na Obr. 52, jako v předchozím případě je odsimulovaná přechodová charakteristika modelu stejnosměrného cize buzeného motoru. Průběh je tentokrát měřen na výstupu zapojení, které je naznačeno na Obr. 51. Zapojení je napájeno stejnosměrným zdrojem o hodnotě 500 mV, což odpovídá žádaným otáčkám, na kterých by se soustava měla ustálit. V tomto případě byly hodnoty proudového a rychlostního regulátoru vypočteny podle metody symetrického optima, kde proudový regulátor vyšel typu PI a rychlostní také typu PI. Podle výpočtu vyšlo optimální zesílení rychlostního regulátoru $K_{R\omega} = 3,12$ (7.10) a časová konstanta $\tau_{R\omega} = 42,72$ ms (7.11). U této metody je dovolený maximální překmit $\delta = 43\%$, což při nastavení vstupního napětí 500 mV odpovídá překmitu 215 mV. Jak je vidět z průběhu, tak překmit je 125mV, čímž je podmínka opět splněna.

Na Obr. 53 jsou opět znázorněny tři průběhy pro různá zesílení rychlostního regulátoru, aby bylo možno vidět, co nastane po nevhodném nastavení parametrů. Modrý průběh je optimální nastavení se zesílením rychlostního regulátoru $K_{R\omega} = 3,12$ (7.10) a časové konstantě $\tau_{R\omega} = 42,72$ ms (7.11). Zelený průběh odpovídá dvojnásobnému zesílení rychlostního regulátoru, což odpovídá zesílení $K_{R\omega} = 6,24$ a časové konstantě $\tau_{R\omega} = 42,72$ ms. Opět je ze zeleného průběhu viditelné, že čím větší zesílení bude nastaveno oproti optimálnímu, tím více bude soustava náchylná ke kmitání a prodlouží se i doba ustálení. Poslední červený průběh odpovídá polovičnímu zesílení rychlostního regulátoru, což odpovídá zesílení $K_{R\omega} = 1,56$ a časové konstantě $\tau_{R\omega} = 42,72$ ms.

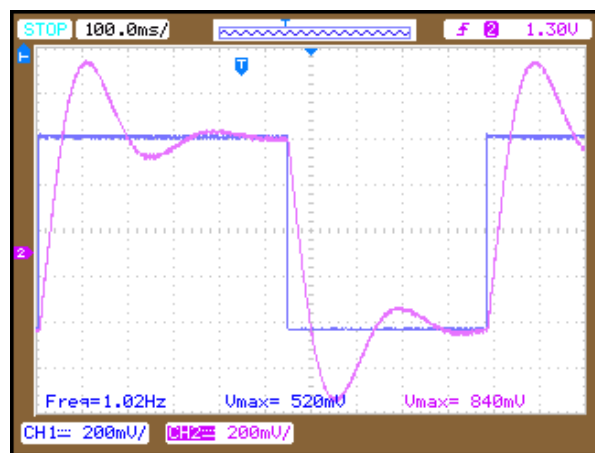


Obr. 53 Průběhy přechodových charakteristik pro různá zesílení rychlostního regulátoru podle výpočtu S0

Průběhy naměřeny na laboratorním přípravku



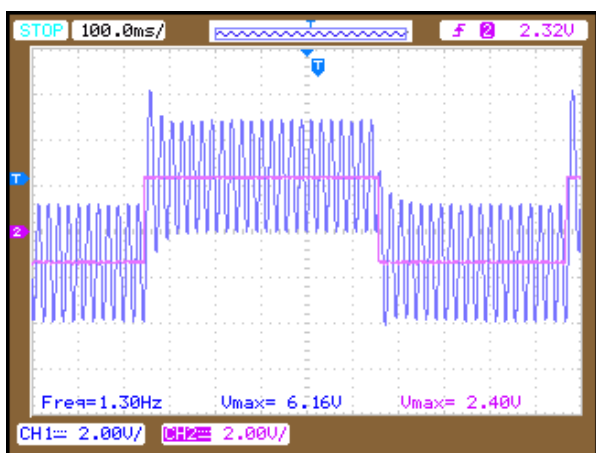
Obr. 54 Vypočtené hodnoty PI rychlostního regulátoru metodou S0 $K_R = 3,12$; $T_R = 42,72$ ms



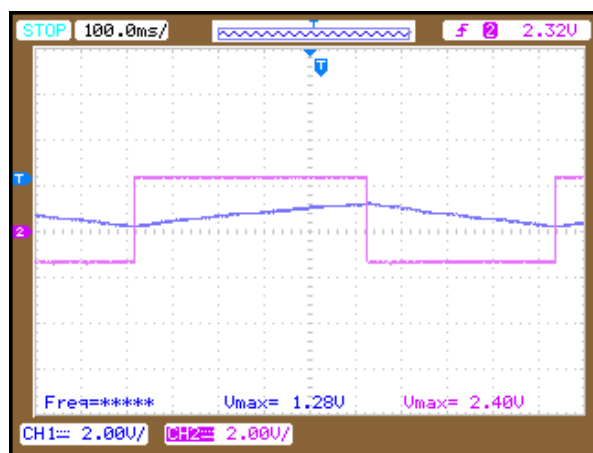
Obr. 55 Nevhodné nastavení - nevhodně nastavený regulátor $K_R=1,6$; $T_R=42,72$ ms

- Modrý průběh – vstupní signál - jedná se o obdélníkový průběh o frekvenci 1 Hz a napětí 500 mV
- Růžový průběh – výstupní signál, který odpovídá výstupním otáčkám stejnosměrného cize buzeného motoru

Jako v předchozím případě pro OM, tak i tentokrát pro SO byly změřeny průběhy na laboratorním přípravku. Tyto průběhy jsou znázorněny na *Obr. 54, 55*. Tyto průběhy se zase shodují se simulačními průběhy, které jsou na *Obr. 53*. Tentokrát podle vypočtených hodnot vyšel jak rychlostní regulátor, tak i proudový typu PI. Na *Obr. 54* je znázorněn optimální průběh podle vypočtených hodnot, což odpovídá zesílení $K_R = 3,2$ a časové konstantě $\tau_R = 42,72$ ms. Z průběhu je dále vidět, že je dodržena podmínka maximálního překmitu, která je u této metody 43%. Povolný překmit tedy může nabýt hodnoty 215 mV a při měření vyšel 208 mV. Dále na *Obr. 55* je znázorněn průběh s polovičním zesílením. Z tohoto nastavení lze vidět, že je nevhodné, protože není dodržen maximální povolený rozkmit.



Obr. 56 Kmitavý průběh



Obr. 57 Aperiodický průběh

Na *Obr. 56* a *57* jsou znázorněny průběhy motoru, kdy byly nastavovány konstanty kotevního obvodu τ_a a setrvačného členu motoru τ_m . Pro nastavení těchto časových konstant platí dvě základní pravidla:

- $\tau_m > 4\tau_a$ - aperiodický průběh – Otáčky motoru nenaběhnou do požadovaných otáček. To lze vidět z *Obr. 57*, kde výstupní otáčky (modrý průběh) nestačí naběhnout do požadovaných.
- $\tau_m < 4\tau_a$ - kmitavý průběh – Díky tomuto nastavení se otáčky motoru rozkmitají a nedojde k ustálení, jak je vidět z *Obr. 56*.

10 Závěr

V rámci této diplomové práce bylo úkolem popsat daný typ měniče a jeho regulační struktury. Je zde popsána jak rychlostní struktura, tak i proudová struktura tohoto měniče. Dále bylo provedeno srovnání s novějším typem měniče a to 6RA80. V další části bylo úkolem navrhnout a vyrobit model stejnosměrného cize buzeného motoru pomocí operačních zesilovačů. Daný laboratorní přípravek byl zhotoven dle pokynů se všemi požadovanými parametry. Tento projekt mě zavedl do problematiky stejnosměrného cize buzeného motoru a jeho regulačních struktur.

V první části této práce je popsán měnič od firmy Siemens SIMOREG DC MASTER řady 6RA70. Je zde popsána jeho rychlostní bloková struktura a také i proudová bloková struktura. Následně je uveden popis parametrizace vybraného typu měniče a jeho uvedení do činnosti. Dále je zde popsán stejnosměrný motor s cizím buzením a jeho regulace rychlostní s podřazenou smyčkou proudu.

V praktické části byl vytvořen laboratorní přípravek modelu stejnosměrného cize buzeného motoru. Nejprve byly navrženy dva simulační modely stejnosměrného cize buzeného motoru v prostředí Orcad_PSpice a MATLAB_SIMULINK. První model je odsimulován pro regulaci rychlosti s podřazenou smyčkou proudu pomocí výpočtu optimálního modulu, druhý pro regulaci výpočtu podle symetrického optima. Následně byl vytvořen laboratorní přípravek, na kterém jsou také změřeny průběhy pro obě tyto regulační metody. Naměřené průběhy oproti simulačním se liší minimálně, což může být zapříčiněno, že simulační programy pracují s ideálními součástkami, což v praxi není samozřejmě dosažitelné.

11 Použitá literatura

- [1] Čermák, T. *Elektrické regulační pohony*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská v Ostravě, 1986. 328 s.
- [2] Pískač, L. *Modelování vybraných elektrických pohonů na analogovém počítači*. 1. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni, 1982. 51 s.
- [3] Neborák I., - Sládeček V. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. 123 s.
- [4] Neborák, I. *Mechatronické systémy*. 1. vyd. Ostrava: : Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [5] Siemens AG, *Návod k obsluze a údržbě SIMOREG DC MASTER řada 6RA70*, Siemens 1998
- [6] *Katalogové listy firmy TEXAS INSTRUMENT*.
URL:
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl084.pdf> [cit. 2013-03-13]
- [7] *Učební texty*
URL:
http://www.fei1.vsb.cz/kat430/data/erp1/EP_regulace%20DC%20motoru.pdf
[cit. 2013-03-25]

12 Přílohy

Přílohy v tištěné podobě:

Příloha A	Modely vytvořeny v prostředí Matlab_Simulink
Příloha B	Parametry motoru pro výpočet regulace
Příloha C	Deska osazení spoje laboratorního přípravku
Příloha D	Deska plošného spoje laboratorního přípravku
Příloha E	Vzorový návod pro laboratorní měření
Příloha F	Seznam součástí laboratorního přípravku

Přílohy v elektronické podobě:

Příloha A	Modely vytvořeny v prostředí Matlab_Simulink
Příloha B	Modely stejnosměrného motoru s cizím buzením v prostředí OrCad PSpice
Příloha C	Deska osazení spoje laboratorního přípravku v programu Eagle 5.7.0
Příloha D	Deska plošného spoje laboratorního přípravku v programu Eagle 5.7.0
Příloha E	Vzorový návod pro laboratorní měření